



Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden korkeakoulu

Kukka Pasonen

## **Eteläisen Espoon runkoviemärin vuotovesiselvitys data-analyysin avulla**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 8.2.2016  
Valvoja: Professori Riku Vahala  
Ohjaajat: FT DI Tiia Lampola ja DI Tuija Laakso

AALTO-YLIOPISTO TEKNIIKAN KORKEAKOULUT PL 12100, 00076 Aalto <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Kukka Pasonen			
Työn nimi: Eteläisen Espoon runkoviemärin vuotovesiselvitys data-analyysin avulla			
Korkeakoulu: Insinööritieteiden korkeakoulu			
Laitos: Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka			
Professuuri: Vesi- ja ympäristötekniikka		Koodi: R902-D	
Työn valvoja: Professori Riku Vahala			
Työn ohjaajat: FT DI Tiia Lampola ja DI Tuija Laakso			
<p>           Vuoto- ja hulevedet kasvattavat jätevesivirtaamaa ja nostavat siten puhdistuskustannuksia, laskevat puhdistustehokkuutta ja aiheuttavat ympäristöhaittoja verkostotulvien ja ohijuoksutusten yhteydessä. Tämän työn aiheena oli tutkia, voiko data-analyysillä selvittää vuoto- ja hulevesien määrää ja lähteitä jätevesiverkostoissa. Tavoitteena oli luoda pohja mallille, jota voidaan käyttää tulevaisuudessa vesilaitoksen koko toiminta-alueen vuotavuuden kartoittamiseen.         </p> <p>           Lähtötietoina työssä käytettiin jätevesipumppaamoiden valuma-alueiden sadetutkatietoja, jätevesivirtaamaa sekä meriveden korkeustietoja. Näitä vertaamalla pyrittiin löytämään alueet, joilla lähtötietojen väliset riippuvuudet olivat korkeimmillaan. Tutkittuja menetelmiä verrattiin virtaama- ja sadetiedoista visuaalisesti tehtyihin arvioihin vuoto- ja hulevesistä.         </p> <p>           Työssä käytettiin kahta analyysimenetelmää: ristikorrelaation ja korrelaation yhdistelmää sekä lineaarista regressioanalyysiä. Ristikorrelaatiolla pyrittiin löytämään sateen ja virtaaman ajallinen yhteys, minkä jälkeen sadetietoja viivytettiin tulosten perusteella. Tämän jälkeen laskennallisesti viivytettyä sadetietoa verrattiin uudelleen jätevesivirtaamaan korrelaatiotestillä. Tässä menetelmässä eniten vuotavalla alueella tulisi olla suurin korrelaatiokerroin. Toisessa käytetyssä menetelmässä selitettiin tuntikohtaista jätevesivirtaamaa sateella, meriveden korkeudella, yläjuoksun pumppaamon virtaamalla, kellonajalla sekä viikonpäivällä. Sateesta, merivedestä ja virtaamasta muodostettiin selittäjiä vähintään 24 viimeksi mitatulle arvolle, jotta malliin saataisiin mukaan selittäjien sekä mallinnetun virtaaman ajallinen yhteys. Lisäksi selvitettiin mallin toimivuutta regressiodiagnostiikan avulla.         </p> <p>           Lineaarisen regression avulla saatiin käsitystä alueellisesta vuotavuudesta ja apua ilmiön ymmärtämisessä. Valituilla selittäjillä oli selvästi vaikutusta virtaamaan. Lineaarisen mallin oletukset eivät kuitenkaan toteutuneet, jolloin selittäjien ja selittäjän välisiä riippuvuuksia ei voitu määrittää luotettavasti. Tulevaisuudessa on suositeltavaa testata jotain epälineaarista regressiomenetelmää. Ristikorrelaation ja korrelaation yhdistelmä ei sen sijaan toiminut, sillä se oli liian yksinkertaistettu malli prosessista.         </p>			
Päivämäärä: 8.2.2016		Kieli: Suomi	
		Sivumäärä: 85+2	
Avainsanat: Jätevesi, vuoto, data-analyysi, jätevesiviemäri, jätevesivirtaama, sade, merivesi, viemäri, lineaarinen regressioanalyysi, korrelaatio, ristikorrelaatio			

AALTO UNIVERSITY SCHOOLS OF TECHNOLOGY PO Box 12100, FI-00076 AALTO <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Kukka Pasonen			
Title: Infiltration/inflow investigation of the main sewer line in southern Espoo using data analysis			
School: School of Engineering			
Department: Civil and Environmental Engineering			
Professorship: Water and Environmental Engineering		Code: R902-D	
Supervisor: Professor Riku Vahala			
Instructors: PhD MSc Tiia Lampola and MSc Tuija Laakso			
<p>           Rain-derived infiltration and inflow increase the flow in sewers and as a consequence raise the treatment expenses, decrease the efficiency of the treatment, and cause harm to the environment when sewer overflows occur or when sewage is redirected past the treatment plant. Consequently this thesis investigates whether data analysis could be utilized as a tool to analyze the infiltration and inflow in sewers on a broad scale. The goal of this was to create the basis for a model that could be employed to map the infiltration and inflow on areas of operation of large water utilities.         </p> <p>           Radar information regarding rainfall, sewage flow, and sea levels for each pumping stations' water basin were used as initial data. By comparing these with each other, the dependencies were estimated between the variables. The results of this were compared to a visual analysis of the flow and rain time series.         </p> <p>           Two different data analysis methods were tested in this thesis. The first one was a combination of cross-correlation and correlation, and the second was a linear regression analysis. The cross-correlation was employed to examine the time-related dependency between sewer flow and rain data. After the rain data was delayed according to the findings, it was again compared to the sewage flow. Here, a correlation test was applied in the analysis. The water basin with the largest inflow/infiltration rate should have the largest correlation coefficient. In the second method, the sewer flow was predicted as a variable depending on the flow data for the up-stream pumping station, rain data, sea levels, day of the week and, time of the day. At least 24 delayed data sets for the flow, rain and sea level data were applied as explanatory variables to account for the time dependencies between the variables and the sewer flow. Additionally, the residuals were studied for their structure and autocorrelation.         </p> <p>           From these methods, the linear regression analysis showed promise although some explanatory variables were not included in the models. These variables could include, for example, the number, operating frequency, and operating time of the running pumps; the level of ground water; the levels of the surface waters; and the seasonal effect. However, the method provided realistic results and will be further developed. The usage of the combination of cross-correlation and correlation did not function as it represents an overly simplified version of the process.         </p>			
Date: 8.2.2016		Language: Finnish	
		Number of pages: 85+2	
Keywords: Sewer, leak, data analysis, sewage, flow, rain, inflow, infiltration, sea water, linear regression analysis, correlation, cross correlation			

## **Alkusanat**

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoululle sekä Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymälle. Aiheen innoituksena toimi HSY:n halu kartoittaa jätevesiverkoston vuoto- ja hulevesiä ja vähentää niiden määrää. Tahdonkin kiittää HSY:tä kesätyöstä sekä sitä seuranneesta diplomityöpaikasta, joiden myötä olen oppinut erittäin paljon vesihuollosta. Kiitän HSY:n lisäksi työtä rahoittanutta Maa- ja vesitekniikan tuki ry:tä apurahasta.

Työni valmistumisesta kiitän erityisesti ohjaajiani FT, DI Tiia Lampolaa ja DI Tuija Laaksoa sekä valvojaani professori Riku Vahalaa heidän arvokkaista neuvoistaan, jotka olivat saatavilla aina kun niitä tarvitsin. Lisäksi kiitän VTL, FM, yliopisto-opettaja emeritus Ilkka Melliniä, TkT Teemu Räsästä ja DI Pasi Pajulaa asiantuntevasta avusta, joka oli työn kannalta korvaamatonta. Työni onnistumiseen vaikuttivat suuresti myös perheeni ja ystäväni, jotka kuuntelivat aina tarvittaessa ja tarjosivat tukensa.

Espoossa 27.1.2016

Kukka Pasonen

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo .....	1
Johdanto .....	2
1 Viemärien vuoto- ja hulevedet .....	4
1.1 Vuoto- ja hulevesien merkitys .....	4
1.2 Vuoto- ja hulevesien lähteet .....	5
2 Laskennalliset menetelmät .....	7
2.1 Lähtötietojen laadun automaattinen validointi .....	7
2.2 Kemialliset menetelmät .....	8
2.2.1 Isotooppimenetelmä .....	9
2.2.2 Epävarmuudet .....	11
2.3 Hydrografiset menetelmät .....	13
2.3.1 Kemiallisen hapenkulutuksen ja sameuden mittaus .....	18
2.3.2 Menetelmän epävarmuudet .....	21
3 Tutkittava alue .....	23
3.1 Runkoviemärin putkimateriaalit ja asennusvuodet .....	25
3.2 Valuma-alueiden vedenkulutus .....	28
4 Lähtötiedot .....	32
4.1 Pumppaamojen toiminta ja virtaamamittaus .....	32
4.2 Tutkitut pumppaamot .....	34
4.3 Meriveden korkeus .....	35
5 Data-analyysi .....	37
5.1 Visuaalinen analysointi .....	37
5.2 Ristikorrelaatio .....	41
5.3 Lineaarinen regressioanalyysi .....	51
6 Tulokset .....	57
6.1 Jätevesivirtaamat ja sadannat .....	57
6.2 Korrelaatiokertoimet .....	65
6.3 Lineaarinen regressioanalyysi .....	67
7 Yhteenveto .....	81
Lähdeluettelo .....	82
Liite 1. Dummy-selittäjät .....	1

## Johdanto

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä (HSY) puhdisti vuonna 2013 131,6 miljoonaa kuutiota jätevettä (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2014). HSY:n arvion mukaan puhdistetusta jätevedestä noin 35 - 45 % on vuoto- ja hulevettä. Vuotovedet kasvattavat kustannuksia sekä ympäristöhaittoja, sillä ne nostavat pumppaus- ja puhdistuskuluja, huonontavat puhdistustulosta, lisäävät ylivuotoja verkostossa sekä jäteveden ohijuoksutusta laitoksella. (Kracht et al. 2008, Zhang 2007, Karpf & Krebs 2011.)

Vuoto- ja hulevesiä voidaan arvioida joko mekaanisesti tekemällä paikallisia tutkimuksia tai mallintamalla jätevesiverkostoa fysikaalisten ja kemiallisten tutkimusten avulla. HSY:ssä vuotavuutta ja hulevesiä on tutkittu pääasiassa TV-kuvauksilla, savukokeilla sekä mallintamalla osia jätevesiverkostosta. Nämä menetelmät ovat kuitenkin aikaa vieviä ja hyvin paikallisia. Savukokeilla ja TV-kuvauksilla voidaan tutkia pienen, mutta ei koko toiminta-alueen vuotavuutta. Tarkan hydraulisen mallin luominen HSY:n toiminta-alueelle on vasta alussa, eikä sitä voida vielä hyödyntää. TV-kuvausten tulkinta on myös aina subjektiivista ja etenkin kuivalla säällä vuotokohtia voi jäädä havaitsematta.

Näiden lisäksi vuotovesien reittejä sekä osuuksia on selvitty HSY:ssä fysikaalisilla mittauksilla, kuten sähkönjohtavuudella ja lämpötilalla. Myös nämä tutkimukset on aina keskitetty tunnetusti vuotavalle alueelle, eikä niitä ole käytetty koko verkoston tilan kartoittamiseen. Näiden menetelmien tulosten tulkintaa vaikeuttaa rannikolla meriveden kulkeminen jätevesiverkostoon, sillä se muuttaa veden ominaisuuksia, kuten sähkönjohtavuutta, eri lailla kuin sade- ja hulevedet.

Aiemmin mainittujen rajoitteiden lisäksi sekä TV-kuvausten että fysikaalisten menetelmien ongelmana on ollut se, että niillä on tutkittu jätevesiverkoston hetkellistä vuotavuutta. Hetkellisesti suoritettut mittaukset kertovat aina vain tutkimushetkellä vallitsevien olosuhteiden vaikutuksesta jätevesivirtaamaan. Tulos voi olla erilainen sateen intensiteetin, keston ja aiempien sateiden vaikutuksen muuttuessa.

Koska näillä aiemmin käytetyillä menetelmillä on tutkittu vuoto- ja hulevesiä paikallisesti, on HSY:llä tarve selvittää alueiden eroja laajemmalla tasolla. Tämän takia tässä

työssä keskitytään laskennallisiin menetelmiin, joita ei ole aiemmin käytetty HSY:ssä vuoto- ja hulevesien arviointiin.

Tässä diplomityössä tutkitaan erityisesti, missä määrin data-analyysi soveltuu viemäri-verkoston vuoto- ja hulevesien tutkimiseen. Tavoitteena on vertailla kahden eri tilastollisen menetelmän soveltuvuutta HSY:n jätevesiverkoston vuoto- ja hulevesianalyysihin. Näiden menetelmien pohjalta pyritään tulevaa käyttöä varten luomaan pohja vuoto- ja hulevesien selvittämisen toimintamallille.

Työssä tutkitaan runkoviemäriä, joka laskee Espoossa Ämmäsuon kaatopaikalta Suomenojan jätevedenpuhdistamolle. Sen vuoto- ja hulevesiä tarkastellaan kahdella data-analyysimenetelmällä: ensin ristikorrelaation sekä korrelaation yhdistelmällä, ja sen jälkeen lineaarisella regressioanalyysillä. Työssä tutkitaan sekä sateen että merenpinnan korkeuden vaikutusta jätevesivirtaamaan. Tässä työssä ei pyritä erittelemään suotautuvan ja suoraan viemäriin vuotavan veden osuuksia erikseen jätevesivirtaamasta vaan arvioimaan vuoto- ja hulevesien kokonaismäärää ja nimeämään verkostosta alueet, joilta vuotovesiä pääsee verkostoon.

Lähtötietoina käytetään Aalto-yliopiston projektissa muodostettuja jätevesipumppaamoiden valuma-alueita ja niihin sovitettuja Ilmatieteen laitoksen sadetutkatietoja, HSY:n pumppaamovirtaamatietoja sekä Ilmatieteen laitoksen merenpinnan korkeuden historia-tietoja.

Työssä käsitellään ensin vuoto- ja hulevesien merkitystä sekä lähteitä jätevesiviemä-reissä. Sen jälkeen esitellään alalla käytettyjä laskennallisia menetelmiä, joista tässä työssä keskitytään kemiallisiin sekä hydrografisiin menetelmiin. Laskennallisten menetelmien jälkeen esitellään tutkittu alue ja käytetyt lähtötiedot, minkä jälkeen käydään läpi data-analyysimenetelmät ja niitä varten tehdyt lähtötietojen muutokset. Lopuksi selostetaan käytettyjen menetelmien tulokset ja niiden pohjalta tehdyt johtopäätökset.

# 1 Viemärien vuoto- ja hulevedet

Vuosina 1977–1999 arvio Suomen jätevesiverkoston vuotuisista vuoto- ja hulevesistä vaihteli 11 % ja 40 % välillä keskiarvon ollessa 24 %. Vaikka jätevesiverkoston kokonaispituus on tämän jälkeen moninkertaistunut, ei vuoto- ja hulevesien määrä ole merkittävästi kasvanut tehtyjen parannusten, kuten erillisviemäröinnin takia. (Karttunen 2003.) HSY:n oman epävirallisen arvion mukaan hule- ja vuotovesiprosentti olisi kokonaisvesimäärästä noin 35 - 45 %. Osa tästä vedestä kuitenkin päätyy verkostoon Helsingin keskusta-alueelta, missä on vielä olemassa sekaviemäröityjä alueita.

Verkostoon päätyvät sinne kuulumattomat vedet ovat hule-, pohja- ja pintavettä sekä vesijohtoverkostosta vuotavaa vettä. Ne jaetaan yleensä suotautuviin sekä nopeasti viemäriin vuotaviin vesiin. Yleensä vuoto- ja hulevedet päätyvät viemäriin kaivojen kansien tai rakenteiden kautta, vuotamalla putkien vaurioituneiden seinämien ja tiivisteiden läpi tai ylivuotorakenteiden kautta (Karpf & Krebs 2011, Prigiobbe & Giulianelli 2009, Muleta & Boulos 2008). Sekaviemäröidyillä alueilla hulevedet johdetaan samaan verkostoon jäteveden kanssa ja sitä kautta puhdistuslaitokselle. Pääkaupunkiseudusta Helsingin ydinkeskustassa on sekaviemäröityjä alueita ja erityisesti näiltä alueilta johdettavat hulevedet nostavat jätevesivirtaamaa. Krachtin et al. (2008) mukaan sekaviemäröidyllä alueella vuoto- ja hulevedet muodostavat noin 70 % jätevesivirtaamasta.

Vuoto- ja hulevesien tutkiminen jaetaan fysikaalisiin, kemiallisiin ja mekaanisiin menetelmiin. Mekaanisia menetelmiä ovat esimerkiksi TV-kuvaukset ja savukokeet. TV-kuvauksessa huuhdellun putken sisäpinta kuvataan ja sen perusteella arvioidaan viemärin kunto. Savukokeilla taas voidaan etsiä maanpäälisiä vuotokohtia sekä virheellisesti liitettyjä hulevesiä. Näiden lisäksi käytetään jäteveden sähkönjohtavuuden ja lämpötilan mitausta, värjäyskokeita, kaikuluotausta ja ilmanpainetestejä. (Lakso 1991, Gokhale & Graham 2004.) Seppisen mukaan (2010) kattava kuva vuoto- ja hulevesistä saadaan usein vain käyttämällä useampaa selvitysmenetelmää.

## 1.1 Vuoto- ja hulevesien merkitys

Viemäriin kuulumattomat vedet kuormittavat puhdistuslaitosta ja ympäristöä. Ne nostavat pumppaus- ja puhdistuskustannuksia sekä lisäävät käsittelykapasiteetin tarvetta ja toi-



saalta laskevat puhdistustuloksia prosessien joutuessa pois optimialueeltaan kun jäteveden osuus puhdistettavasta vesimäärästä laskee. (Zhang 2007, Karpf & Krebs 2011.) Jos sateiden tai sulamisvesien aikaan verkostoon päätyy paljon ylimääräistä vettä, se voi tulla aiheuttaen haittaa rakennetulle- sekä luonnonympäristölle. Tämä on suuri riski varsinkin sekaviemäröidyillä alueilla. Vaikka kasvanut virtaama ei aiheuttaisikaan tulvia, voi se johtaa jäteveden ohijuoksutukseen puhdistuslaitoksella. Tällöin vesistöön päätyy puhdistamatonta jätevettä. (Karpf & Krebs 2011.) Vuoto- ja hulevesien mukana viemäriin päätyy myös sedimenttiä (esimerkiksi hiekkaa), joka huonontaa virtausmahdollisuuksia ja lisää huoltotarvetta (Kracht et al. 2008).

Toisaalta viemäriverkostoon päätyvillä vuoto- ja hulevesillä on myös positiivisia vaikutuksia. Karpfin ja Krebsin (2011) mukaan kasvanut virtaama parantaa putken huuhtoutuvuutta, jolloin sedimentit eivät pääse kertymään viemäriin. Parantunut virtaus ja laimentuneet jätevedet myös vähentävät rikkivedyn muodostumista ja näin ehkäisevät hajuhaittoja sekä korroosiota. (Kracht et al. 2008). Joillakin alueilla myös pohjaveden pinnan lasku voi olla tarpeellista, tosin tämä voidaan hoitaa myös hulevesiratkaisuilla. (Karpf & Krebs 2011). Aiemmin kohtuullisia määriä ylimääräisiä vesiä viemäriverkostossa pidettiin niiden positiivisten vaikutusten takia toivottavina, kun taas nykyään ne pyritään eristämään pois järjestelmästä niiden huonojen vaikutusten johdosta. (Kracht et al. 2008). Vuoto- ja hulevesien vaikutusten kartoittamiseksi on tarpeen määritellä niiden suuruusluokat sekä esiintymisalueet (Karpf & Krebs 2011).

## **1.2 Vuoto- ja hulevesien lähteet**

Viemäriin kuulumattomat vedet päätyvät sinne heikentyneiden rakenteiden, kuten huonokuntoisten putkien seinämien ja tiivisteiden läpi suotautumalla sekä viallisista kaivorakenteista, avonaisista kaivonkansista ja ylivuotorakenteista sisään vuotamalla (Karpf & Krebs 2011, Prigiobbe & Giulianelli 2009, Muleta & Boulos 2008). Vettä voi päätyä verkostoon pohja- ja huleveden lisäksi pintavesistä, kuten vesistöistä tai ojitukselta (Kracht et al. 2008). Viemäriin on voitu myös liittää virheellisesti tonttien hulevesiputkia tai vesijohtoverkostosta voi vuotaa vettä jätevesiverkostoon.

Tyypillisesti sisään viemäriin virtaava vesi aiheuttaa jätevesivirtaaman kasvun hyvin nopeasti, kun taas verkostoon suotautuva vesi vaikuttaa myöhemmin ja pitkäkestoisemmin

virtaaman määrään (Muleta & Boulos 2008). Koska suotautuminen tapahtuu vioittuneiden putkien ja vuotavien liitosten kautta, voidaan pitkään sateiden jälkeen normaalia korkeammalla pysyneestä virtaamasta päätellä, että myös putket ja liitokset vuotavat (Muleta & Boulos 2008, Lakso 1991). Kaupunkialueilla sadevedestä pienempi osa kulkeutuu jätevesiverkostoon suotautumalla maan läpi, sillä suurempi osuus maasta on päällystetty (Hietanen 2008).

Vuoto- ja hulevesien sisäänpääsyn syyt voidaan jakaa putkien ja kaivojen rakenteellisiin vikoihin ja toiminnallisiin puutteisiin. Rakenteellisia vikoja ovat esimerkiksi raot, murtumat, liitosten siirtyminen ja romahdukset. (Gokhale & Graham 2004.) Rakenteellisten vikojen takia myös viemärikaivojen kautta päätyy vuoto- ja hulevesiä jätevesiverkostoon erityisesti sateiden ja lumensulamisen aikaan. Yleisimmin kaivot vuotavat kannen raoista tai renkaiden välistä, jotka voivat nousta roudan seurauksena. Vuoto- ja hulevesien vähentämiseksi kaivoista voidaan tarkistaa silmämääräisesti niiden kansi, renkaat sekä lähtevien putkien liitännöiden tiiviys. (Lakso 1991.) Toiminnallisiksi haitoiksi jätevesiverkostossa lasketaan esimerkiksi juuret. Niiden rikkoman putken läpi vesi pääsee suotautumaan verkostoon. (Gokhale & Graham 2004.) Lisäksi vettä voi päätyä verkostoon ylivuotoraakenteiden kautta. Usein ylivuotovedet ohjataan läheisiin ojiin tai vesistöihin, mutta niistä saattaa myös päästä pintavettä sisään verkostoon erityisesti silloin, kun veden pinta vesistössä on korkealla.

Näiden erilaisten verkostovikojen kautta suotautuvien ja vuotavien vesien määrään vaikuttavat myös vallitsevat olosuhteet, kuten pohjaveden syvyys, sateen kesto, intensiteetti ja paikallinen vaihtelevuus, aiemmat sateet, ympäröivän maan koostumus, maanpinnan muoto sekä hulevesi- ja vesijohtoverkostojen kunto (Muleta & Boulos 2008).

## 2 Laskennalliset menetelmät

Suotautuvien ja maanpinnalta suoraan jätevesiverkostoon vuotavien vesien osuutta jätevesiviemäriin kuulumattomista vesistä on yritetty arvioida monilla eri tavoilla, jotka yleensä perustuvat hydrografisiin tai kemiallisiin aikasarjamenetelmiin tai näiden yhdistelmiin, joita usein sovelletaan kuivan ajanjakson avulla. Koska tuotettu jätevesi ja ylimääräinen vesi sekoittuvat keskenään, ei menetelmillä saatuja tuloksia voida tarkistaa. Tästä syystä kaikissa arviointimenetelmissä on epävarmuuksia, jotka pitää arvioida ja joiden valossa tuloksia pitää tarkastella. (Kracht et al. 2008.)

Kokonaiskuva viemäriverkoston vuotavuudesta voidaan saada vertaamalla laskutetun puhtaan veden määrää puhdistamolle tulleen jätevesimäärään. Tässä on tosin otettava huomioon, että myös vedenjakeluverkosto saattaa vuotaa ja osa tästä vuotovedestä voi päätyä viemäriin. Ylipäänsä vesitaseen avulla laskettu vuotavuus on usein epätarkka alueellisesti sekä absoluuttisesti ja tästä syystä esimerkiksi Kracht et al. (2008) eivät suosittele tätä tapaa käytettäväksi. Vesitaseesta voi saada erillisviemäroidyltä alueelta yleiskuvan koko alueen vuotavuudesta, mutta paikalliseen tai tarkkaan arviointiin se ei ole useiden muuttujien ja alueiden hankalan rajauksen takia riittävä. Jätevesi- ja vesijohtoverkostojen erilaisuudesta johtuen on hankala erottaa yhteneväisiä mitattavia alueita. Tämä hankaloittaa vesitaseen muodostamista, kun puhtaan veden ja jäteveden määriä ei voida seurata yhtenevältä alueelta reaaliaikaisesti. Vuositasolla vuotavuutta voidaan arvioida vertaamalla alueelle pumpatun ja laskutetun veden määrää.

Laskennallisista menetelmistä tässä työssä esitellään kemiallisia sekä hydrografisia menetelmiä. Näiden lisäksi on olemassa esimerkiksi fysikaalisia menetelmiä, joilla tarkoitetaan jätevesivirtaaman jonkin fysikaalisen ominaisuuden mittaamista ja sen perusteella vuoto- ja hulevesien arvioimista. Tällainen fysikaalinen mittari saattaa olla esimerkiksi jäteveden sähkönjohtavuus, joka vaihtelee vesilähteiden mukaan (Gokhale & Graham 2004).

### 2.1 Lähtötietojen laadun automaattinen validointi

Koska kaikkiin laskennallisiin menetelmiin liittyy esimerkiksi mittauksesta ja menetelmästä aiheutuvia epävarmuuksia, Métadier ja Bertrand-Krajewski (2011 b) ehdottivat käytettäväksi menetelmiä, joilla voidaan automaattisesti varmistaa kalibroidun mittarin

tuottaman datan laatua. Menetelmää voidaan soveltaa esimerkiksi virtaama-, sameus- ja sähkönjohtavuusmittauksiin.

Ehdotetut toimet koskivat erilaisia varmistusmenetelmiä, mitä ohjelmistoihin voitaisiin lisätä. Ehdotuksia oli kahdeksan kappaletta ja ensimmäinen niistä oli, että mitattu data on kirjattu ylös eikä se osu huoltopäivän kanssa päällekkäin. Toisekseen data ei saa olla mittausrajojen ulkopuolella. Näiden jälkeen testataan onko mitattu arvo 2,5 % ja 97,5 % välillä kaikista mitatuista arvoista tietyllä sensorilla tietyssä paikassa. Testi neljä tarkistaa, että edellisestä huoltopäivästä ei ole kulunut liikaa aikaa. Tämän jälkeen testi viisi etsii yhtäkkisiä nousuja tai laskuja arvoissa vertaamalla raakadatan arvoa muuttuvaan keskiarvoon tai mediaaniin. Testissä kuusi verrataan kahden samassa kohteessa sijaitsevan mittarin arvoja, jotta löydettäisiin epätavallisia trendejä ja välejä aikasarjassa. Testissä seitsemän taas verrataan kahden peräkkäisen mittarin arvoja. Viimeisessä testissä arvioidaan mittausarvon laatua vertaamalla sitä toisiin arvoihin, joiden kanssa se korreloi. Tällaiset toisistaan riippuvaiset arvot voivat olla esimerkiksi pinnankorkeus ja virtausnopeus. (Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 b.)

Testit antavat tulokseksi yhden kolmesta: hyvä data, epäilyttävä data tai huono data. Lopullinen laadun tarkastus ja parannus tehdään käsin automaattisten merkintöjen pohjalta. Datan arvioija päättää esimerkiksi karsitaanko kaikki huonoksi arvioitu data ja kuinka epäilyttävään dataan suhtaudutaan kussakin tapauksessa. Lopullisena tuloksena syntyy datasetti, jossa on vain käytettäväksi tai huonoksi luokiteltuja arvoja. (Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 b.)

Näiden testien käyttöön ottaminen kalibroiduille mittareille olisi erittäin hyödyllistä HSY:ssä, sillä se vähentäisi huomattavasti käsin tehtävän työn määrää. Valitettavasti iso osa mittareista ei ole kalibroituja ja niiden tuottamat tiedot ovat huonolla tasolla. Olisi kuitenkin mahdollista tehdä tietojen automaattista validointia kaikille kalibroiduille mittareille, jolloin mittarien heikkeneminen sekä poikkeustilanteet olisi helpompaa havaita.

## **2.2 Kemiaalliset menetelmät**

Kemiaalliset menetelmät perustuvat luonnonmukaisen merkkiaineen pitoisuuksien eroihin eri vesilähteissä ja näiden suhteiden analysointiin. Merkkiaineen on oltava luonnollinen, sillä vesijohtoverkostoon tai pohjavesiin ei voida lisätä vieraita aineita (Kracht et al.

2008.). Tämän takia päädytään usein käyttämään kemiallista hapenkulutusta, sameutta tai luonnollisia isotooppieroja. Kemiallisista menetelmistä kemiallista hapenkulutusta ja sameutta voidaan käyttää myös yhdessä hydrografisten menetelmien kanssa, jolloin virtaaman eri fraktioiden erottelu saadaan tarkemmaksi. Nämä menetelmät on esitelty hydrografisten menetelmien yhteydessä kappaleessa 3.2.

### 2.2.1 Isotooppimenetelmä

Isotooppimenetelmässä pyritään löytämään isotooppi, joka vaihtelisi eri vesilähteiden mukaan ja jonka osuus vedessä pysyisi muuttumattomana. Tämän takia yleisin käytetty isotooppi on hapen isotooppi  $^{18}\text{O}$ . (Prigione & Giulianelli 2009, De Bénédictis & Bertrand-Krajewski 2005 b, Kracht et al. 2008, Houhou et al. 2010.) Tutkimuksissa on käytetty myös vedyn  $^2\text{H}$ -isotooppia ja rikin  $^{34}\text{S}$ -isotooppia (Houhou et al. 2010, Kracht et al. 2008). Isotooppeja verrattiin veden ja liuenneen sulfaatin standardoituihin isotooppimääriin meressä (De Bénédictis & Bertrand-Krajewski 2005 b, Houhou et al. 2010).

Menetelmässä jätevesi jaetaan vesijohtoverkostosta peräisin olevaan veteen sekä vuoto- ja hulevesiin. Tämän vaatii toimiakseen mittauksia kaikista mahdollisista vesilähteistä sekä epävarmuuksia suuremmat erot isotooppikoostumuksissa niiden välillä (Kracht et al. 2008, Prigione ja Giulianelli 2009). Jotta isotoopit olisivat riittävän erilaisia, on raakavesilähteen oltava yleensä kaukana tutkitusta alueesta. Raakavesilähteitä on myös oltava vain yksi, jotta eri isotooppikoostumuksen vedet eivät pääse sekoittumaan verkostossa. Veden isotoopit riippuvat sateesta ja alueen sijainnista, haihdunnasta, tiivistymisestä sekä maaperän koostumuksesta. (De Bénédictis & Bertrand-Krajewski 2005 b.) Veden isotooppien suhteet muuttuvat erityisesti alueilla, joilla sade tai pintavesi imeytyy pohjavedeksi. Jotta jätevesiverkostoon kuulumattomien vesien isotooppisuhteiden pienestä paikallisesta vaihtelusta voidaan olla varmoja, on tehtävä alueelle geologinen ja hydrologinen kartoitus. (Kracht et al. 2008.) Toinen mahdollisuus on määrittää pohjaveden isotooppikoostumukset alueellisesti, mutta haasteena tässä on riittävät erot näiden välillä sekä jäteveden ja suotautuneen veden sekoittumien jätevesiviemäriässä Tätä menetelmää kokeiltiin Ecullyn 245 ha valuma-alueella Ranskassa. Tutkijat totesivat sen perusteella isotooppimenetelmän olevan mahdollinen vaihtoehto vuoto- ja hulevesien määrittämiseen, mutta samalla se sisältää epävarmuuksia, joita täytyy pyrkiä vähentämään. (De Bénédictis & Bertrand-Krajewski 2005 b).

Koska sulfaatilla on monia luonnossa esiintyviä isotooppeja, se voisi toimia hyvänä isotooppimerkkiaineena. Sulfaatti ei kuitenkaan ole välttämättä riittävän reagoimaton yhdiste varsinkaan niissä jätevesiviemäreissä, missä on runsaasti sulfaatteja aineenvaihdunnassaan käyttäviä mikrobeja. (Houhou et al. 2010.) Ämmäsuolta Suomenojalle virtaavassa linjassa on ollut tällaisiin mikrobeihin viittaavia hajuhaittoja sekä korroosio-ongelmia, minkä takia liukoisen sulfaatin isotooppikoostumus ei luultavasti soveltuisi merkkiaineeksi tässä työssä tutkitulle alueelle. Mikrobien aiheuttamien muutosten lisäksi Houhou et al. (2010) huomasivat, että erityisesti alumiinisulfaatin käyttö raakaveden koagulaatiossa lisäsi isotooppien vaihtelua juomavedessä. Kaiken lisäksi sulfaatin pitoisuus todettiin niin pieneksi sadevedessä, että sateen aiheuttaman virtaaman arviointi oli mahdollonta (Houhou et al. 2010).

Monissa tutkimuksissa on selvitetty vain pohjaveden vuotavuutta, jotta sateen isotooppikoostumus on voitu jättää huomiotta (Prigione ja Giulianelli 2009). Suotautumisen oletetaan tutkimuksissa yleensä olevan tasaista, mutta De Bénédictis & Bertrand-Krajewski (2005 b) huomauttivat, että jopa oletus tasaisesta suotautumisesta yhden päivän aikana saattaa olla virheellinen, sillä he huomasivat, että vettä suotautuu hieman enemmän öisin kuin päivisin. Tämä saattaa johtua muista suotautuvista vesistä kuin pohjavedestä, joita ei ole osattu ottaa huomioon. Mahdollisia suotautuvia vesiä voivat olla esimerkiksi kuivatusvedet ja jäähdytysvedet (De Bénédictis & Bertrand-Krajewski 2005 b.) Toisaalta tulos saattaa johtua siitä, että öisin putket ovat tyhjempiä ja useammista vioista voi vuotaa enemmän vettä verkostoon. Samoin myös päiväsaikaan vuotavien putkien rakojen vuotavuus saattaa nousta öisin.

Myös mahdolliset pintavesilähteet täytyy kartoittaa ja niiden koostumukset mitata (Kracht et al. 2008). Tutkimus ei myöskään ota huomioon, että osa vesijohtovedestä päättyy viemäriin vesijohtovuodoista. Tässä tutkimustavassa se oletetaan suoraan tuotetuksi jätevedeksi.

Mittauksia on suoritettava mahdollisimman monta, jotta mittaustuloksiin sekä isotooppikoostumuksen paikalliseen ja ajalliseen vaihteluun liittyvät epävarmuudet pienenevät (De Bénédictis & Bertrand-Krajewski 2005 b). Näytteitä pitäisi ottaa erityisesti paikoista, joiden epäillä olevan vuotokohtia. (Kracht et al. 2008.) Tutkimuksissa voidaan käyttää

joko aikasarjoja tai mittausten keskiarvoja riippuen tavoitteista. (De Bénédictis & Bertrand-Krajewski 2005 b). Kracht et al. (2008) totesivat myös, että tutkimuksen tulosten kannalta lähtötieto vuotokohtien arvioidusta tiheydestä oli tärkeä, sillä asettamalla niiden määrä oikeaan suuruusluokkaan menetelmän epävarmuudet pienenevät huomattavasti. Kun tutkimuksessa oletettiin vikoja olevan vain yksi, oli tulos suotautuneen veden määrästä aliarvioitu. (Kracht et al. 2008.) Jos menetelmä otettaisiin käyttöön, olisi siis arvioitava oletus vioista per putkikilometri.

Isotoopit asetetaan vakioiksi ja jätevedestä seurataan niiden suhteita. Jäteveden suhteellisesta koostumuksesta voidaan johtaa vuotavan veden määrä, sillä jos se koostuu juomavedestä sekä pohjavedestä, sen isotooppikoostumuksen täytyy asettua niiden isotooppien suhteiden väliin. (Prigione ja Giulianelli 2009.) Suotautuvan veden suhteellinen osuus on suurimmillaan öisin pienimmän vedenkulutuksen aikana ja pienimmillään päivisin kulutushuippujen aikaan. Kun mitataan samalla myös jätevesivirtaaman määrää, saadaan pohjaveden absoluuttinen arvo. (Kracht et al. 2008.)

Teoriassa tätä menetelmää voisi soveltaa tulevaisuudessa HSY:n alueella, koska alueen ainoa raakavesilähde tulee olemaan Päijänne. Tällöin pohjaveden ja raakaveden isotoopit olisivat luultavasti riittävän erilaisia toisistaan ja menetelmä olisi teoriassa toimiva. Alueella on kuitenkin paljon pintavesistöjä ja merivesi vaikuttaa osaan jätevesiverkostoa. HSY:n koko toiminta-alueelta ei ole myöskään olemassa tarkkoja hydrogeologisia tietoja ja pohjavesitutkimusten tekeminen olisi työlästä. Isotooppimenetelmä vaatii siis hyvin paljon työtä tiheiden laboratoriomittausten, raskaan data-analyysin ja pohjavesitutkimuksen kanssa eikä siksi ole välttämättä sovellettavissa HSY:n kokoisella toiminta-alueella.

### **2.2.2 Epävarmuudet**

Tutkimuksissa arvioitiin myös saatujen tulosten epävarmuuksia. Tarkkuuteen vaikuttivat tehdyt yksinkertaistukset sekä oletukset. Pohjaveden laadun paikallisen vaihtelun oletettiin olevan pieni ja vesijohtoveden ominaisuuksien olevan muuttumattomia. Nämä yleistyksen tarkastettiin kokeen jälkeen ja niiden paikkansapitävyys arvioitiin. Lisäksi virhettä aiheutuu oletuksista putkivikojen määrissä ja vuotovesien lähteissä.

Syöpymisen ja vikojen aiheuttavat vauriot määräävät jäteveden isotooppikoostumuksen, sillä eri lähteiden isotooppien painoarvo jätevedessä määräytyy niiden suotautumismäärien mukaan. (Prigiobbe ja Giulianelli 2009, Kracht et al. 2008.) Pohjaveden ja pintavesien tasojen vaihtelu sekä oletus tasaisesta suotautuvuudesta aiheuttavat myös epävarmuutta tutkimuksessa, kun jätevesivirtaaman isotooppikoostumus muuttuu vuoden- sekä kellonajan mukaan. (De Bénédictis & Bertrand-Krajewski 2005 b.) Metodin heikkoutena on myös se, että niiden vuotovesilähteiden vaikutusta, mitä ei ole arvioitu analyysijä aloittaessa, ei voida ottaa ollenkaan huomioon mallissa (Kracht et al. 2008). Houhou et al. (2010) totesivatkin, että analyysiä vaikeutti tuntemattomat vuotovesien lähteet.

Tutkimuksissa virheitä aiheutui lisäksi esimerkiksi instrumentaatiosta, inhimillisistä virheistä, paikallisista ja ajallisista vaihteluista isotoopeissa, näytteiden otosta, laboratorio-analyyseista, käytetyistä mittareista, merkkiaineen säilymisestä, näytteiden säilytyksestä ja analyysimenetelmästä. (Prigiobbe ja Giulianelli 2009, Kracht et al. 2008.) Kracht et al. (2008) huomauttavat, että näytteidenotossa oli otettava huomioon happea ja vetyä seurattaessa näiden isotooppien välinen korrelaatio. Jos tätä korrelaatiota ei oteta huomioon, niin epävarmuudet ovat lopputuloksessa liioiteltuja. Kracht et al. (2008) muistuttivat myös, että arvioinnissa pitää ottaa huomioon myös aiemmat tiedot verkoston vioista, sillä ne parantavat tutkimuksen luotettavuutta. Prigiobben ja Giulianellin (2009) tutkimuksessa todettiin kuitenkin menetelmän olevan soveltumaton tarkkaan analyysiin ja pienien vuotojen etsimiseen jopa 20 prosentin virhetason takia, mutta huomauttivat samalla, että sillä saatiin suuntaa antavia tuloksia verkoston kunnosta (Prigiobbe ja Giulianelli 2009). Suurimmat virheet aiheutuivat kuitenkin virtaaman mittaamisesta ja Kracht et al. (2008) totesivat, että vaikka absoluuttisen suotautumisvirtaaman määrittämisessä oli virheitä, suotautumisen osuus jätevesivirtaamasta oli varmimmin arvioitavissa.

Useimmissa tutkimuksissa virheet arvioitiin Monte Carlo -simulaatiolla, jossa mallinnetaan esimerkiksi tuhat erilaista skenaariota (Prigiobbe ja Giulianelli 2009, Kracht et al. 2008). Monte Carlo -simulaatiota varten isotooppimenetelmästä on tehtävä oletuksia, sillä muuttujien todellisia vaihteluita ei voida täysin arvioida. Ensinnäkin isotooppien laboratoriokokein määriteltäville normaalijakaumalle on arvioitava standardipoikkeavuudet. Toiseksi on arvioitava virheet, jotka aiheutuvat vedenpinnan ja virtausnopeuden arvioinnista. Menetelmä antoi kuitenkin vastaavia tuloksia kuin muut siitä riippumattomat



tutkimukset ja epävarmuuksilla ei ollut sen tuloksiin suuria vaikutuksia. (Kracht et al. 2008.)

## 2.3 Hydrografiset menetelmät

Hydrografisilla menetelmillä arvioidaan vuoto- ja hulevesien määrää mitatusta jätevesivirtaamasta. Hydrografisia menetelmiä ei ole käytetty HSY:ssä, sillä ne ovat suuritöisiä ja niihin sisältyy huomattavia epävarmuuksia (Janhunen 2016). Näiden menetelmien yhteydessä voidaan kuitenkin käyttää myös kemiallisia menetelmiä tarkkuuden parantamiseksi (Métadier & Bertrand-Krajewski 2011 a).

Useimmiten hydrografisissa menetelmissä kuivan sään osuus sateisen ajan jätevesivirtaamasta pyritään arvioimaan kuivan ajan virtaaman avulla. Näin tekivät esimerkiksi Métadier ja Bertrand-Krajewski (2011 a) sekä Muleta ja Boulos (2008). Tämän jälkeen mitatusta jätevesivirtaamasta erotetaan oletettu tuotettu jätevesivirtaama ja ylijäämää pidetään sateen aiheuttamana osuutena.

Tässä menetelmässä kuivan ajan virtaamaan kuuluu myös suotautuva pohjavesi ja sen määräksi arvioidaan yleensä yöajan minimivirtaama. Tämä ei kuitenkaan päde varsinkaan suurissa kaupungeissa, kuten HSY:n alueella, joissa kotitaloudet tuottavat jätevettä myös öisin. (Bareš et al. 2012.) Samoin teollisuuden vedenkulutus saattaa olla odottamatonta ja ajoittua mihin aikaan vuorokaudesta tahansa. De Bénédictis ja Bertrand-Krajewski (2005 a) toteavatkin eri menetelmiä vertaileessa tutkimuksessaan, että yön pienimpään virtaamaan perustuvat metodit usein yliarvioivat suotautumisen ja tähän menetelmään perustuvissa tutkimuksissa on käytettävä pitkää tutkimusaikaa. Pohjaveden osuuden arvioimiseksi on kehitetty erilaisia kertoimia, mutta ne ovat aina subjektiivisia eivätkä tarjoa luotettavia tuloksia (Kracht et al. 2008).

Lisäksi pohjaveden suotautuvuuden ajatellaan usein pysyvän vakiona, vaikka se todellisuudessa vaihtelee etenkin vuodenajan mukaan (Zhang 2005). Sen sijaan, että kuivan sään yöajan minimivirtaaman oletettaisiin olevan suoraan pohjavettä, jakavat monet tutkimukset sen nykyään pohjavedeksi ja tuotetuksi jätevedeksi (Kracht et al. 2008). Yöajan jätevesivirtaamat ovat myös hyvin vaihtelevia. Tämän vaihtelun takia De Bénédictis ja Bertrand-Krajewski (2005 a) ehdottivat, että suotautuvuuden arvioinnissa tulisi käyttää vähintään 8-10 kuivaa päivää epävarmuuksien pienentämiseksi. Vaikka kuivia päiviä

olisi enemmän, epävarmuudet eivät enää laskisi merkittävästi. 8-10 kuivalla päivällä epävarmuuden taso oli tutkimuksessa noin 15 %. Bareš et al. (2012) ehdottivat vuoto- ja hulevesien seuraamista koko vuoden ajan, jotta vuodenaikojen aiheuttama vaihtelu voidaan ottaa huomioon. Suomessa näiden tutkimusten analyysieihin voi vaikuttaa routa sekä lumen sulamisvedet keväällä.

Tämän työn tavoitteena ei kuitenkaan ollut erotella toisistaan suotautuvaa ja suoraan viemäriverkostoon vuotavaa vettä toisistaan eikä näin ollen oltu kiinnostuneita niinkään pohjaveden osuuden määrittämisestä, vaan niiden alueiden löytämisestä, joilla näiden yhteinen vaikutus on suuri.

De Bénédittis ja Bertrand-Krajewski (2005 a) huomauttavat myös, että pohjaveden ja saateen lisäksi maasta voi suotautua myös muita vesiä jätevesiverkostoon. Tällaisia vesiä ovat esimerkiksi vesijohtovuodot, kasteluvedet tai maanalaisten rakenteiden vesijärjestelmät.

Sen sijaan vedenkulutus vaihtelee viikonpäivän ja kellonajan funktiona ja tämä pyritään ottamaan huomioon monissa tutkimuksissa. Niissä useimmiten kuivan ajan käyrät muodostetaan erikseen arkipäiville ja viikonpäiville sekä arkipyhille kuivan sään virtaamien keskiarvoista (Métadier & Bertrand-Krajewski 2011 a) Toinen vaihtoehto olisi muodostaa kuivan ajan käyrät erikseen jokaiselle viikonpäivälle, kuten tässä työssä tehtiin. Myös Zhang (2007) suosittelee arvioimaan virtaamia erikseen viikonpäivien perusteella. Näiden lisäksi virtaama arvioidaan tunneittain jokaiselle tyyppivuorokaudelle (Métadier & Bertrand-Krajewski 2011 a). Joissakin menetelmissä, kuten Krachtin ja Gujerin (2005) tutkimuksessa, käytettiin vain yhtä kaikille vuorokausille yhteistä hydrografia hyvin tuloksin.

Jos vuodenajasta ja vuodesta johtuva vedenkulutuksen muutos ja pohjaveden tason muutos haluttaisiin ottaa huomioon, käyrät voitaisiin muodostaa vielä erikseen jokaiselle kuukaudelle ja vuodelle. Métadierin & Bertrand-Krajewskin (2011 a) Lyonissa Ranskassa suoritetussa tutkimuksessa ei kuitenkaan löytynyt eroavaisuuksia vuodenaikojen tai vuosien välillä.

Métadier ja Bertrand-Krajewski (2011 a) pyrkivät vähentämään olosuhteiden, kuten vuodenajan, muutoksien vaikutusta sateesta aiheutuvan virtaaman arviointiin. He vertasivat sadetapahtumien aikaisia jätevesivirtaamia läheisten kuivien päivien virtaamakäyriin ja pyrkivät näin arvioimaan sateesta aiheutuneen osuuden. Tavoitteena oli löytää vastaava virtauskäyrä, joka sopi sadetapahtumaan paremmin kuin yleinen koko vuodelle muodostettu käyrä. Kuivan ajan virtaamakäyristä valittiin se, joka sopi parhaiten sateisen virtaamakäyrän alku- ja loppupäihin. Jos vertailun käyrän muoto oli sopiva, mutta absoluuttiset arvot eivät, kuivan ajan käyrää saatettiin muokata pienimmän neliösumman menetelmällä. Tämän tarve arvioitiin visuaalisesti. (Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 a.)

Kuivien käyrien piti lisäksi olla riittävän pitkiä, jotta ne riittivät ajallisesti verratun sateen vaikutusten yli. Niiden ei tarvinnut olla kokonaisia päiviä, kunhan ne kattoivat koko sadetapahtuman sekä tasaantuneet virtaamat sadetapahtuman alussa ja lopussa. Ne saattoivat toisaalta koostua myös useista päivistä, jos sadetapahtuma kesti pitkään. Tällainen käyrä mallintaa kuivan sään osuutta todennäköisesti kaikkein parhaiten. Menetelmässä käytettiin hyvin tiheää kahden minuutin aika-askelta. (Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 a.)

Välillä valittu käyrä ei mukaillut absoluuttisilta arvoiltaan jätevesivirtaamaa, mutta sen suhteelliset muutokset olivat oikeanlaisia. Tällöin ne voitiin sovittaa paremmin kuvaavaksi skaalaamalla niiden kokoa. Käyrät muokattiin pienimmän neliösumman menetelmällä niin, että mitattujen ja mallinnettujen arvojen väli jäi mahdollisimman pieneksi. Virtaamakäyrän tarve sovittamiseen arvioitiin visuaalisesti. Tämä ei kuitenkaan yleensä ollut tarpeen ja tapaukset joissa sitä käytettiin, olivat sadetapahtumia joiden läheltä ei löytynyt sopivaa kuivan sään käyrää. Tällaisia tapahtumia olivat yleensä pidempään kuin päivän kestävät sadetapahtumat tai aukot aikasarjassa. (Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 a.)

Ennen kuivan ajan hydrografien muodostamista lähtötietoja korjataan ja niistä poistetaan tiedot, joiden laadusta ollaan epävarmoja. Näiden epäluotettavien tietojen lisäksi Muleta ja Boulos (2008) poistivat vedenkulutukseltaan epätyypilliset päivät, kuten juhlapyhät, lähtötiedoista. Puuttuvat välit interpoloitiin. (Muleta & Boulos 2008.) HSY:ssä vaatimus luotettavista lähtötiedoista poistaisi suuren osan mahdollisista tutkittavista ajankohdista

ja mittauspaikoista, sillä dataseiteissä on katkoja esimerkiksi tiedonsiirron ongelmista johtuen. Toisaalta kaikilta pumppaamoilta ei saada ollenkaan luotettavaa virtaamatietoa virheellisten mittausten takia. Vaikka virtaamatiedot ovat usein suhteellisilta muutoksiltaan oikeita, ei niiden absoluuttisten arvojen paikkansapitävyydestä ole useinkaan tietoa. Tällöin lähtötiedoista ei voida päätellä vuoto- ja hulevesien määrää, mutta niiden osuus jätevesivirtaamasta on arvioitavissa (Kracht et al. 2008).

Jotta voidaan muodostaa kuivan ajan virtaamakäyrä, on ensin päätettävä kuivan ajan kriteerit. Usein näihin kriteereihin lasketaan vaatimukset yhtenäisistä ja luotettavista virtaamien ja sateiden lähtötiedoista sekä jokin raja-arvo sateen määrälle tietyn ajanjakson sisällä (Métadier & Bertrand-Krajewski 2011 a, Muleta & Boulos 2008). Lisäksi edellisestä raja-arvon ylittävästä sateesta on oltava kulunut riittävä aika, jotta hitaasti viemäriin suoutautuva vesi ei enää vaikuta jätevesivirtaamaan. Mitä suurempi valuma-alue on, sitä pidempään sateen vaikutus voi näkyä. Métadier ja Bertrand-Krajewski (2011 a) käyttivät riittävänä aikana neljää tuntia edellisestä sateesta. Kuivan jakson vaadittava yhtenäinen pituus on yleensä vähintään vuorokausi (Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 a.). Sateen rajan soveltuvuus voidaan varmistaa vielä tilastotieteellisin keinoin tai visuaalisesti virtaamakuvaajista (Muleta & Boulos 2008).

Tämä menetelmä vaatii kuitenkin monia mittauspisteitä ja paljon luotettavaa virtaamatietoa, mikä voisi olla ongelma HSY:n kokoisella toiminta-alueella. Myös kuivan ajan virtaaman arvio on aina epäluotettava ja suuret teollisuuskuluttajat voivat aiheuttaa virtaamapiikkejä jotka voidaan virheellisesti tulkita sateen aiheuttamiksi. Jotta näiden virhearvioiden vaikutus voidaan poistaa, täytyy tutkimusjakson olla pitkä. Tällöin voidaan miettiä, kuinka kalliiksi laajat pitkäaikaiset mittaukset tulisivat.

Kuivan sään ja sateisen sään hydrografien avulla ja hyödyntäen hydraulista mallinnusta valuma-alueelta voidaan myös mallintaa vuoto- ja hulevesien vaikutusta sekä erilaisia skenaarioita verkostossa. Mallia rakennettaessa luodut hydrografit syötetään malliin niin, että ne jaetaan eri kulutuspisteiden kesken. Niiden lisäksi Muleta ja Boulos (2008) syöttivät malliin geneettisellä algoritmilla optimoidut parametrit. Nämä parametrit kuvasivat kolmea eri vuoto- ja suotautumiskäyrää. Ne jaoteltiin nopean vasteen käyräksi, keskimääräisen vasteen käyräksi ja hidasta suotautumista kuvaavaksi käyräksi. Niiden ajateltiin kuvaavan eri vuoto- ja suotautumisnopeuksia erilaisille vesille. Näiden lisäksi voisi lisätä

parametrejä, jotka kuvaavat muita olosuhteita, kuten painumien varastointitilavuutta. Mallintamalla pyritään ennustamaan erilaisia tilanteita ja valitsemaan paras saneerausmenetelmä. (Muleta & Boulos 2008.)

Mallinnettaessa parametrit kalibroidaan automaattisesti geneettisellä algoritmilla, jolla mallinnettua jätevesivirtaamaa verrataan mitattuun jätevesivirtaamaan. Paremmiin sopivat parametrit ovat todennäköisemmin seuraavan mallin lähtöparametreinä. Malliin voidaan lisätä erilaisia rangaistuksia, jotka huonontavat mallin sopivuutta, jos valitaan ei-toivotut parametrit. Mallien kehittäminen loppuu, kun tilastollinen todennäköisyys on vaaditulla tasolla, saavutetaan mallinnuksen laskemiseen käytetty maksimimäärä kalibrointikierroksia, jonka ohjelma sallii tai mallia ei voida enää muutamalla kalibrointikerralla parantaa. (Muleta & Boulos 2008.)

Karpf ja Krebs (2011) kehittivät täysin erilaisen hydrografisen kuiviin päiviin perustuvan vuotojen arviointimenetelmän. He pyrkivät arvioimaan suotautuvan veden sekä pintavesistä jätevesiverkostoon päätyvän veden määrät ja erottelemaan nämä toisistaan. Tämä tapahtui muodostamalla kummallekin osalle yhtälöt ja kalibroimalla parametreja niin, että summatut tulokset vastasivat havaittua jätevesivirtaamaa kuivan sään aikana. Menetelmänä oli pienimmän neliösumman minimoiminen kun mallinnettuja virtaamia verrattiin mitattuihin jätevesivirtaamiin. Tutkimuksessa pintavesien vuodot jaettiin jatkuviin ja tilapäisiin vuotovesiin. (Karpf ja Krebs 2011.)

Pohjaveden suotautumisen arviointi perustui Darcyn lakiin, jossa suotautuminen riippuu pohjaveden ja jäteveden pintojen korkeuserosta, vuotavan putkipinnan pinta-alasta, maaperän läpäisevyydestä ja suotautumiskerroksen paksuudesta. Darcyn laki ei kuitenkaan ota huomioon kaikkia muuttujia, kuten vuotokohdan muotoa ja arvioon tarvitaan hyvin paljon dataa. Koska pinta-ala, läpäisevyys sekä suotautumiskerroksen paksuus ovat vakioita kullekin putkelle, voitiin ne yhdistää yhdeksi kertoimeksi, joka samalla sisältää muut vaikuttavat tekijät. Tällä menetelmällä epävarmasta ja paljon dataa vaativasta menetelmästä saatiin yksinkertaisempi ja useammat tekijät huomioon ottavampi. (Karpf ja Krebs 2011.)

Tilapäinen veden vuotaminen arvioitiin Toricellin lähestymistavalla. Siinä viemäreihin päätyvän pintaveden katsotaan olevan peräisin tulvimisesta, jolloin vesi pääsee viemäri-verkostoon yleensä kaivojen kautta. Tilapäinen virtaus riippuu painekorkeudesta, leikkauspinta-alasta sekä kertoimesta joka kuvaa sisäänpääsyaukon muotoa. Pinta-alan ja aukon muotoa kuvaava kerroin on kuitenkin hankala määrittää, joten Karpf ja Krebs (2011) yhdistivät ne yhdeksi muuttujaksi, jota taas arvioidaan pienimmän neliösumman menetelmällä. Jatkuva vuotaminen taas arvioitiin kertomalla pintaveden valunta vakiokertomella. (Karpf ja Krebs 2011.)

Tätä menetelmää Karpf et al. (2011) jalostivat sopivaksi mallinnukseen. Toinen vaihtoehto olisi heidän mukaansa yhdistää jätevesiverkoston, pintavesien ja pohjavesien mallit yhdeksi suureksi malliksi, mikä taas on hyvin työlästä. Darcyn ja Torricellin lakeihin perustuvassa menetelmässä käytettiin reunaehtoina luotuja pohja- ja pintavesihydrografeja ja mallinnettiin näin verkostoon suotautumista, sisään valuntaa, ulos suotautumista sekä ylivuotoja. Tutkimuksen tulosten mukaan suotautumisella ei ole merkittävää vaikutusta verkoston ylivuotoihin, vaan niistä ovat vastuussa sisään virtaavat vedet. (Karpf ja Krebs 2011.)

Tätä menetelmää sovellettiin Dresdenin jätevesiverkostossa ja sen tuloksia verrattiin mittattuihin kuivan ajan jätevesivirtaamiin. Menetelmää voisi käyttää esimerkiksi eri valuma-alueiden kuivan ajan vuoto- ja hulevesien vertailuun. Menetelmä ei soveltuisi koko HSY:n toiminta-alueelle, joka on pinta-alaltaan hyvin laaja, sillä se vaatii tarkkoja paikallisia tietoja pohjavedestä ja kalliopohjasta. Näistä on pistemäistä tietoa, mutta pisteiden pitkät välimatkat sekä pohjaveden tason alueellinen vaihtelevuus tekevät menetelmästä soveltumattoman HSY:n tarkoituksiin. Myös pintaveden vuodoissa pitäisi määrittää niille virtaamat sekä kaikille tilapäisille vuodoille erikseen painekorkeus, mikä on käytännössä mahdotonta.

### **2.3.1 Kemiallisen hapenkulutuksen ja sameuden mittaus**

Kuivan sään virtaaman lisäksi hydrografien komponentteja voidaan arvioida kemiallisten epäpuhtauksien avulla. Tutkittavaksi valitaan epäpuhtaus, jota ei esiinny käytännössä ollenkaan suotautuvissa vesissä tai mahdollisesti merkkiaine, jonka pitoisuus eri lähteissä tunnetaan. (Bareš et al. 2009.) Tällöin ei tarvitse arvioida kaikkia mahdollisia suotautumisen lähteitä eikä mitata niiden epäpuhtauspitoisuuksia. Näistä Krachtin ja Gujerin

(2005), Dorvalin et al. (2010) Métadierin ja Bertrand-Krajewskin (2011 a) sekä Barešin et al. (2012) menetelmissä kuivan ajan virtaaman arviointiin yhdistettiin kemiallisen hapenkulutuksen ja sameuden mittaus pohjaveden suotautumisen tutkimiseksi. Jätevesivirtaaman mittaus on yleensä jatkuvaa, kun taas kemiallista hapenkulutusta ja sameutta mitataan eri aika-askeleilla. (Bareš et al. 2012) Kemiallista hapenkulutusta mitattiin suoraan jätevedestä UV-valon avulla (Kracht & Gujer 2005). Kaikki mittarit on kalibroitava laboratorionäytteiden avulla (Kracht et al. 2008, Bareš et al. 2012). Näissä yleisimpiä aika-askeleita olivat 2 minuuttia sekä 6 minuuttia (Kracht & Gujer 2005, Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 a, Bareš et al. 2012). Kemiallisten epäpuhtauksien lisäksi hydrografien erottelussa on käytetty signaalinkäsittelyä taustaaäänen eristämiseksi (Dorval et al. 2010).

Kemialliset tutkimukset tarkentavat arvioita suotautumisesta kuivalla säällä. Suotautuneen veden arvioitiin olevan kuivalla säällä pohjavettä eikä sen pitäisi lisätä sameutta tai kemiallista hapenkulutusta. Kun suotautuvien vesien vaikutus kuivana aikana on arvioitu, voidaan niiden määrän arvioida olevan suunnilleen vakio ja soveltaa sitä sateisten olosuhteiden tutkimiseen, vaikka jo aiemmin todettiin pohjaveden suotautuvuuden vaihtelevan mahdollisesti vuodenajan ja vuoden mukaan. (Kracht & Gujer 2005.)

Kemiallisten menetelmien, kuten sameuden ja kemiallisen hapenkulutuksen mittaamisen lisäys puhtaasti hydrografiseen menetelmään parantaa tulosten luotettavuutta, sillä tällöin vältetään joitain tyypillisimpiä yleistyksiä. Näihin kuuluu esimerkiksi oletus siitä, että kuivan sään yöajan pienin virtaama koostuu pelkästään suotautuvasta pohjavedestä. Kemiallisella menetelmällä virtaaman sameudesta tai kemiallisesta hapenkulutuksesta voidaan päätellä tuotetun jäteveden osuus. (Kracht & Gujer 2005.) Toisaalta tähän liittyvät omat epävarmuutensa, sillä tässä oletetaan epäpuhtauksien määrän per asukas olevan ennalta määriteltä ajan funktio jätevedessä. Kuitenkin jäteveden tuotto ei ole täysin tasaista ja esimerkiksi teollisuuskuluttajien jätevesien koostumus vaihtelee suuresti verrattuna asukkaiden tuottamaan jäteveeseen. De Bénédictis & Bertrand-Krajewski (2005 a) totesivatkin, että epäpuhtausmenetelmällä saatiin muihin menetelmiin verraten liian suuria tuloksia.

Tässä menetelmässä kokonaisen sadetapahtuman epäpuhtauden kokonaismassa arvioidaan kertomalla sameudesta johdettu konsentraatio virtausmäärällä ja summaamalla kaikki aika-askeleet yhteen. Epäpuhtauksien kokonaismäärä taas koostuu kuivan sään

osuudesta sekä sateen aiheuttamasta kuormituksesta. Nämä voidaan erottaa toisistaan kuivan sään mittausten avulla. (Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 a.) Vuoto- ja hulevesien määrää voidaan verrata joko yöajan minimivirtaamaan tai keskiarvovirtaamaan (Bareš et al. 2012).

Samoin kuin virtaamien määrille, myös sameudelle Métadier ja Bertrand-Krajewski (2011 a.) sovittivat läheisten kuivien päivien sameuskäyriä, jotta sadetapahtumasta johtuva sameus voitiin arvioida mahdollisimman tarkasti. Myös näitä käyriä skaalattiin paremmin sopiviksi, mutta erityisesti sameuden kohdalla jätettiin satunnaiset piikit käyrissä huomiotta. (Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 a.)

Kemiallista hapenkulutusta ja sameutta voidaan käyttää suotautuvien vesien arviointiin myös ilman laajaa hydrografista tutkimusta, jolloin siinä on piirteitä sekä kemiallisesta että hydrografisesta menetelmästä. Tässäkin menetelmässä mitataan epäpuhtauksia jätevedestä ja niiden konsentraatioiden avulla päätellään kuinka paljon viemäriin kuulumatonta vettä suotautuu verkostoon. Sen sijaan, että verrattaisiin sameutta myös kuivien päivien sameuskäyriin, kuten Métadier ja Bertrand-Krajewski (2011 a.) tekivät, verrataan konsentraatioita suoraan kokonaisjätevesimäärään ja päätellään siitä suoraan vuoto- ja hulevesien osuus. Bareš et al. (2012) sekä Bareš et al. (2009) saivat kummatkin hyviä tuloksia tällä menetelmällä.

Krachtin et al. (2008) tutkimus perustuu jäteveden kemiallisen hapenkulutuksen aikasarjaan. Suotautuvan veden määrä arvioitiin kalibroimalla parametrit niin, että mallinnettua virtaamaa verrattiin samaan aikaan mitattuun kuivan ajan jätevesivirtaamaan. Kracht et al. (2008) mainitsivat, että koska toisin kuin hydrografisissa menetelmissä tässä verrataan jatkuvasti mitattua kemiallista hapenkulutusta kokonaisjätevesivirtaamaan eikä tehdä oletusta joka päivä samanlaisesta hydrografista, sen pitäisi antaa ajallisesti tarkempia tuloksia.

Menetelmä ei olisi sovellettavissa HSY:n toiminta-alueelle, sillä se vaatisi erittäin tiheän ja kalliin mittausverkoston sekä jatkuvan mittareiden kalibrointiohjelman. Menetelmä voisi toimia osavaluma-alueella, jos vuotavuutta haluttaisiin tutkia tarkemmin.



### 2.3.2 Menetelmän epävarmuudet

Epävarmuuksien arviointi oli tutkijoiden mielestä erittäin tärkeää, sillä vedenkulutuksesta johtuvan jätevesivirtaaman osuutta ei voida mitata tai muuten varmasti todistaa sateisena aikana. Myös suotautuvan vesimäärän erottaminen täysin luotettavasti kuivan ajan virtaamasta on mahdotonta. Yksi epävarmuutta aiheuttava tekijä onkin oletus siitä, että kuivan sään yöajan minimivirtaama on suotautuvan pohjaveden määrä (Kracht et al. 2008). Toisekseen hydrografisissa menetelmissä oletus tietynlaisista tyyppipäivistä ja niitä kuvaavista hydrografeista aiheuttaa virheitä tuloksiin varsinkin jos tutkimusaika ei ole pitkä. Näistä aiheutuvia epävarmuuksia voi pienentää muodostamalla useampia hydrografeja erityyppisille päiville tai käyttämällä Métadierin ja Bertrand-Krajewskin (2011 a) menetelmää, jossa virtaamaa verrataan aina läheisen kuivan päivän virtaamaan.

Métadierin ja Bertrand-Krajewskin (2011 a) mukaan kuitenkin myös päivän valitsemis- menetelmästä, sovittamisesta ja virtauksen sovittamistarpeen arvioinnista visuaalisesti aiheutuu korvaamiseen virhettä. Tätä virhettä voidaan arvioida sovittamalla arvioituja käyriä kuivien päivien kuvitteellisten sadetapahtumien päälle ja mittaamalla ero havaitun ja mallinnetun arvon välillä. Métadier ja Bertrand-Krajewski (2011 a) arvioivat kuormien määrät ja epävarmuudet 95 % luottamusvälillä.

Näiden epävarmuuksien lisäksi sateen ominaisuudet vaihtelevat paikallisesti suuresti, joten arviot sateesta voivat olla virheellisiä. Tämän takia saadaan luotettavampia tuloksia jos käytetään sovitettua sadetutkadataa sateen arvioimiseksi.

Näissä malleissa myös oletetaan, että verkostoon vuotava vesi sekoittuu heti homogeeniseksi virtaamaksi jätevesivirtaaman kanssa. Näin ei kuitenkaan todellisuudessa ole ja myös tämä seikka lisää menetelmän epävarmuutta. (Kracht & Gujer 2005.)

Tuloksiin aiheutuu epävarmuutta mittareista, niiden kalibroinnista, käytetystä analyysitekniikasta sekä siitä, että todellinen arvo on korvattu mallinnetulla arvolla. (Kracht et al. 2008, Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 a). Arvioissa epäpuhtauksien kokonaismäärästä on virheitä, jotka johtuvat mittausepävarmuudesta vedenpinnan korkeudessa, virtausnopeudessa ja sameudessa. Myös virtauksen ja konsentraation arvioinnin metodeista aiheutuu epävarmuutta. (Métadier ja Bertrand-Krajewski 2011 a.) Krachtin et al. (2008)

simulaatiossa toisaalta piti ottaa huomioon epävarmuutta laskeva mittauspoikkeaman ja kalibroinnin korrelaatio. Myös oletus suotautuvien vesien kemiallisen hapenkulutuksen nollatasosta voi olla väärä. Krachtin et al. (2008) tutkimusten mukaan tästä oletuksesta seuranneet virheet olivat kuitenkin häviävän pieniä.

Samoin kuin isotooppimenetelmissä, monissa hydrografitutkimuksissa, joista esimerkkinä Kracht ja Gujer (2005), Bareš et al. (2012) sekä Kracht et al. (2008), epävarmuuksia tutkittiin Monte Carlo simulaatiolla. Monte Carlo simulaatiossa generoidaan useita samanlaisia simulaatioita ja selvitetään menetelmien tilastollinen todennäköisyys.

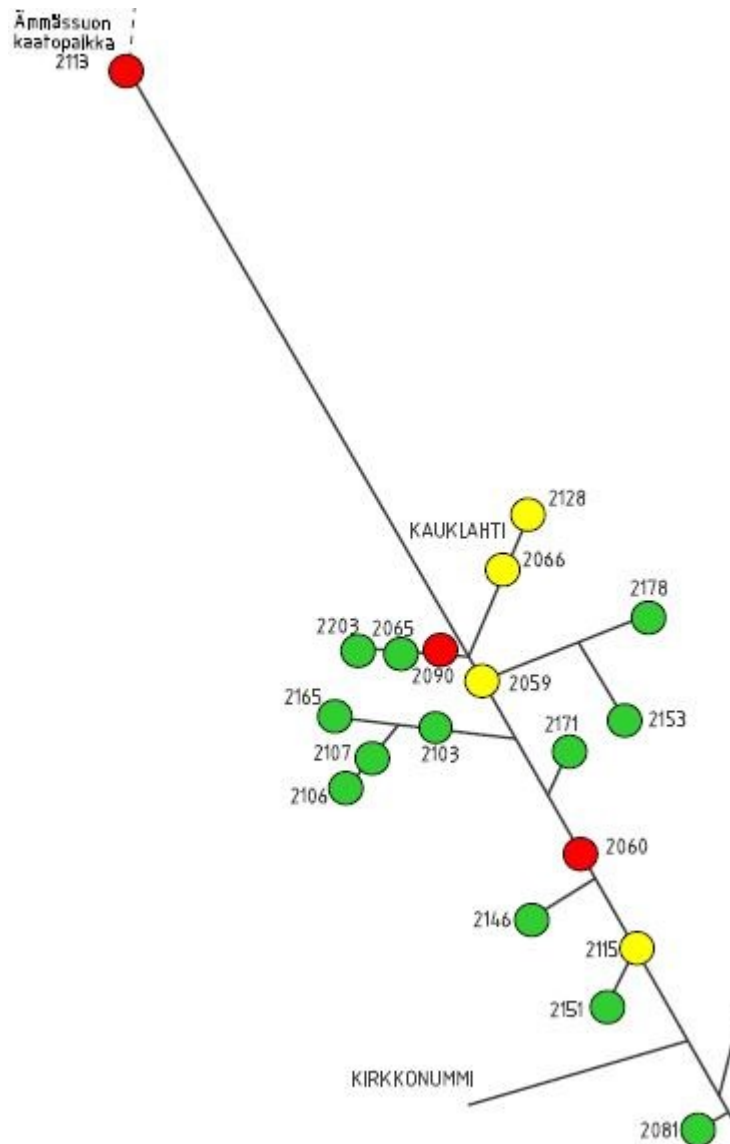
Toisaalta monissa tutkimuksissa ei tutkittu tulosten tilastollista merkitsevyyttä juuri lainkaan. Tällöin tulosten tulkitseminen on varsin subjektiivista ja eri metodien vertailu on käytännössä mahdotonta. Parhaan menetelmän valinta vaikeutuu, kun ei tunneta eri menetelmien tulosten laatua. (De Bénédictis ja Bertrand-Krajewski 2005 a.)

### 3 Tutkittava alue

Työssä verrataan jätevesivirtaamaa ja sadantaa toisiinsa ristikorraatiolla, jotta löydetäisiin näiden ajallinen yhteys. Tämän jälkeen viivytetään saatujen tulosten mukaan sadetietoja ja verrataan niitä uudelleen jätevesivirtaamaan korrelaatiotestillä. Jätevesipumppaamon valuma-alueen, jonka sade ja virtaama korreloivat eniten keskenään, pitäisi vuotaa eniten. Tässä yhteydessä tutkitaan myös, onko päivittäisen kuivan sään keskiarvovirtaaman vähentämisellä jätevesivirtaamasta vaikutusta tuloksiin. Tutkimus suoritetaan erikseen kahdelle sateiselle jaksolle sekä koko tutkimusjaksolle.

Ristikorraation ja korrelaation lisäksi tehdään lineaarinen regressioanalyysi jätevesivirtaamalle. Tässä jätevesivirtaama pyritään selittämään ylävirran pumppaamon virtaamalla, sateella, meriveden korkeudella, kellonajalla sekä viikonpäivällä. Analyysin jälkeen tarkastellaan mallien residuaaleja virtaaman ja ajan funktiona sekä Durbinin ja Watsonin testillä niiden luotettavuuden arvioimiseksi.

Tutkittava alue on osa Espoossa Ämmässuon jätteenkäsittelylaitokselta Suomenojan jätevedenpuhdistamolle laskevan runkoviemärin valuma-alueesta. Viemärin pohjoispuolella sijaitsevasta toisesta runkoviemäristä on varayhteys Ämmässuon pumppaamolle. Tätä yhteyttä käytetään vain poikkeustilanteissa. Runkoviemäri on paineviemäriä suunnilleen ensimmäiselle runkopumppaamolle eli JVP2059 Kauklahdelle asti ja siitä eteenpäin pääasiassa viettoviemäriä. Jätevesipumppaamoja on rungossa viisi ja haaroissa 36. Osa tutkitusta linjasta on havainnollistettu kuvassa 1.



*Kuva 1: Ämmässuolta Suomenojalle laskeva runkoviemäri*

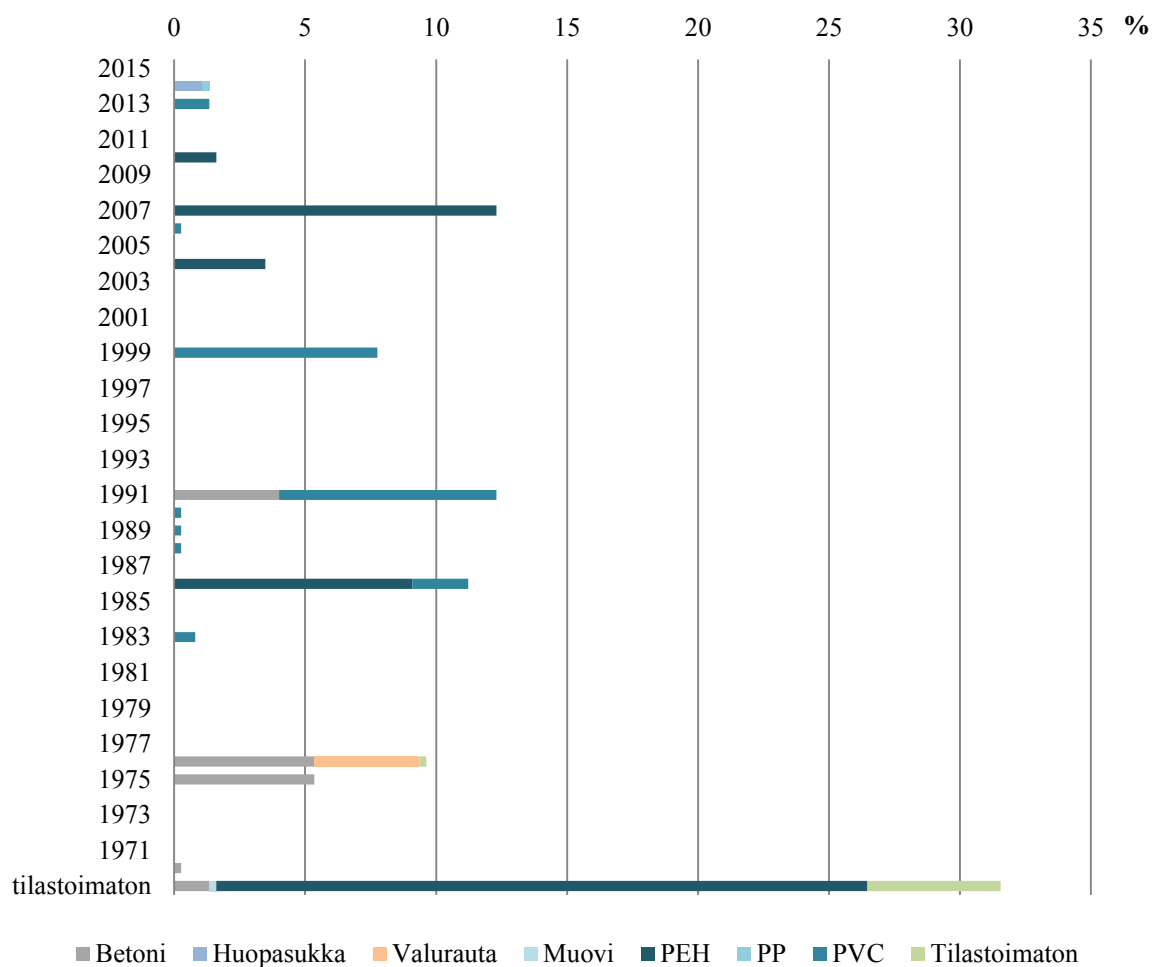
Runkopumppaamoista pohjoisin sijaitsee Ämmässuolla ja eteläisin juuri ennen Suomenojan jätevedenpuhdistamoa. Kaikilla näistä runkopumppaamoista mitataan jätevesivirtaamaa, mutta Suomenojan jätevesipumppaamo ei tuota luotettavia tuloksia. Tästä syystä se on jätetty pois tutkimusalueesta. Ämmässuon jätevesipumppaamo JVP 2113 seuraavat runkopumppaamot ovat JVP 2059 Kauklahti, JVP 2060 Muulo ja JVP 2115 Saunalahti. Näistä Muulon mitatut jätevesivirtaamat ovat suurempia kuin alajuoksun Saunalahden pumppaamon vastaavat arvot. Mittaustulokset Muulossa ovat kuitenkin suhteessa toisiinsa todenmukaisia, joten saatua tietoa voidaan käyttää analyyseissä. Muulon ja erityisesti Saunalahden valuma-alueet rajautuvat mereen, joten niissä on suurempi todennäköisyys meriveden päätymiselle viemäriverkostoon.

Tutkittavassa runkoviemärissä on muuta HSY:n viemäriverkostoa enemmän korroosiota aiheuttavia yhdisteitä Ämmäsuon jätteenkäsittelykeskuksen takia. Ämmäsuolta lähtevässä jätevedessä on paljon orgaanista ainesta, jota mikrobit hapettavat ravinnoksi. Vaapaan hapen sekä nitraattien ja nitriittien loppuessa eräät bakteerit pystyvät käyttämään sulfaattia toisarvoisena hapenlähteenä. Sulfaatit muuttuvat mikrobien aineenvaihdunnan kautta rikkivedyksi. Rikkivety taas on kaasumainen myrkyllinen yhdiste, joka esimerkiksi betonisen viemärin pinnalla muuttuu ilman vaikutuksesta rikkihapoksi ja syövyttää putkea. (Yang et al. 2004.) Betonin ja rikkihapon reagoidessa syntyy ettringiittiä, jonka tilavuus on seitsemän kertaa suurempi kuin rikkihapon. Ettringiitti rikkoo betoniputkea aiheuttaen halkeamia lisäten vaikutuspinta-alaa rikkihapolle. (Zhang et al. 2008.) Myös vahvistetut putket kärsivät korroosiosta (Anttila 2007). Rikkivedyn aiheuttamat korrosio-ongelmat ovat yleisiä tutkitun kaltaisissa viemäreissä, joissa kulkee paljon orgaanista ainesta sisältävää jätevettä.

Ämmäsuolla sade- ja hulevedet suotautuvat erilaisten jätelajien läpi, jolloin vesi likaantuu niin, että sitä ei voida enää ohjata hulevesiverkostoon tai imeyttää maaperään. Sade- ja hulevesi kerätään niille varattuihin altaisiin, joista ne pumpataan mahdollisimman taiseisesti viemäriin. Altaat pyritään pitämään tyhjinä, jotta sateisiin pystytään varautumaan mahdollisimman hyvin. Tämän seurauksena Ämmäsuolta päätyy paljon sade- ja hulevettä viemäriverkostoon.

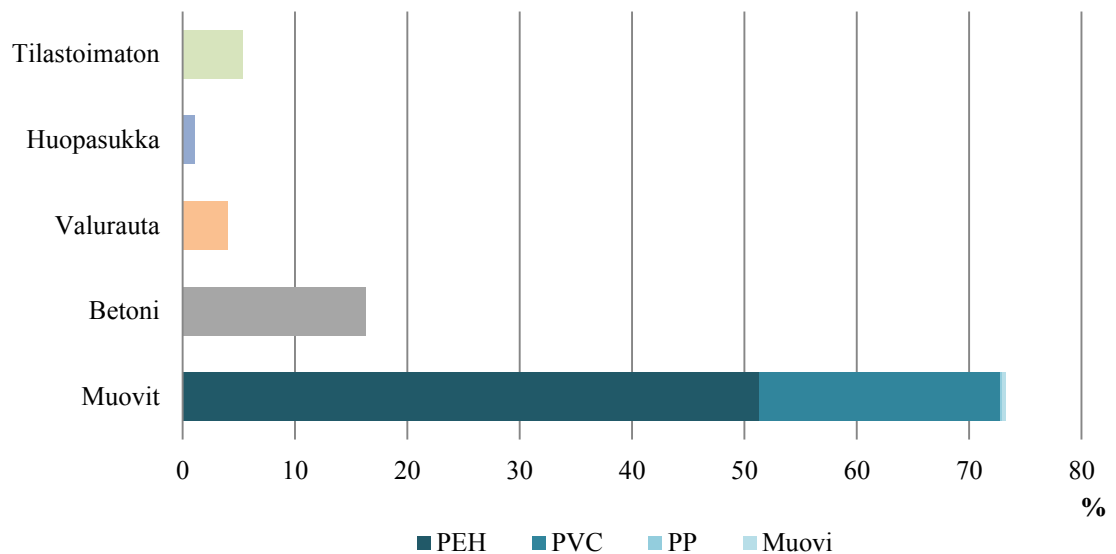
### **3.1 Runkoviemärin putkimateriaalit ja asennusvuodet**

Tutkitun alueen tilastoiduista putkista suurin osa on rakennettu vuonna 1975 ja 1976, 1986, 1991, 1999 ja 2007, kuten kuvasta 2 nähdään. Viemärilinjan vieressä kulkevista vesijohdoista aikaisimmat asennustiedot ovat 60-luvun lopusta ja viemärien suunnittelukuvien perusteella linjaa on alettu rakentamaan juuri 60-luvun lopulla ja 70-luvun alussa. Linjan rakentamista on jatkettu 80-luvun puolivälissä. Viemärit ovat vanhimmillaan noin 50 vuotta vanhoja.



Kuva 2: Runkoviemärin putkimateriaalit asennusvuosittain

Kuvan 3 mukaan tilastoiduista putkista noin 73 % on materiaaliltaan erilaisia muoveja, joista yleisin on PEH. Loput ovat pääasiassa PVC:tä. Muovien lisäksi runkoviemäreiden yleisiä putkimateriaaleja ovat betoni ja valurauta. Putkista muutama prosentti on saneerattu sukkasujutuksella. Viideltä prosentilta putkista puuttuu materiaalitiedot.



*Kuva 3: Runkoviemärien putkimateriaalit per putkimetri*

Materiaaliltaan tilastoimattomat putket ovat lähes aina niitä, joilta ei löydy merkintää myöskään asennusvuodesta. Asennusvuodeltaan tilastoimattomia putkia on kuitenkin huomattavasti enemmän kuin materiaalimerkitsemättömiä. Kun materiaalitietoa ei löydy parilta prosentilta viemäreistä, niin vastaava luku asennusvuosimerkinnöille on 32 %. Putket, joille ei ole merkitty asennusvuotta, ovat todennäköisesti alkuperäisiä viemäreitä ja ne on rakennettu samanaikaisesti vesijohtojen kanssa.

Asennusvuodeltaan tilastoimattomat putket ovat materiaaliltaan lähinnä PEH:iä ja betonia. Kaikki alueen valurautaiset putket on asennettu vuonna 1976. Betonisia viemäreitä on rakennettu 1970-luvun loppupuoliskolla ja aivan 1990-luvun alussa. Huopasukitettuja putkia on alettu käyttää vasta vuonna 2014. Viime vuosina rakennetut putket ovat olleet erilaisia muoviputkia, joiden yleisin materiaali on jälleen PEH-muovi.

Viemärimateriaaleilla on erilaisia tyyppiongelmia suhteessa vuotavuuteen. Betoniviemäreissä on verkostopituutta kohden enemmän saumoja sekä putkissa että kaivoissa. Saumat ovat yleisimpiä vuotokohtia ja niistä voi esimerkiksi tunkeutua juuria sisään viemäriin. Toisaalta hyvin tehdyt saumat voivat olla täysin tiiviit. Betoni- ja valurautaviemäreissä esiintyy myös korroosio-ongelmia toisin kuin muovirakenteissa. Korroosiota kestävä materiaali voi vähentää pinnan läpi suodautuvan veden pääsyä viemäriin erityisesti tutkitun

kaltaisessa viemärissä, jossa orgaanisen aineksen pitoisuus voi olla suuri. Betoniset kaivot ovat myös alttiimpia routanousulle.

Muoviputkissa alkuasennuksen sivustatuenta on tärkeää, jotta putket eivät painu soikeiksi. Muovi on putkimateriaalina hyvin korroosionkestävää, mutta verrattuna betoni- ja valurautaviemäriin muoviputkien viat voivat olla massiivisia, jolloin koko rakenne on mennyt rikki. Muovi ei myöskään kestä yhtä raskasta liikennekuormaa kuin betoni ja valurauta.

Viemärimateriaalista tai iästä ei siis voida päätellä suoraan linjan vuotavuutta vaan se on aina tapauskohtaista. Kaikkein tärkeintä viemärien vuotamisen ehkäisemiseksi on huolellinen suunnittelu ja asennus, mikä ehkäisee toiminnallisia ongelmia (Janhunen 2016).

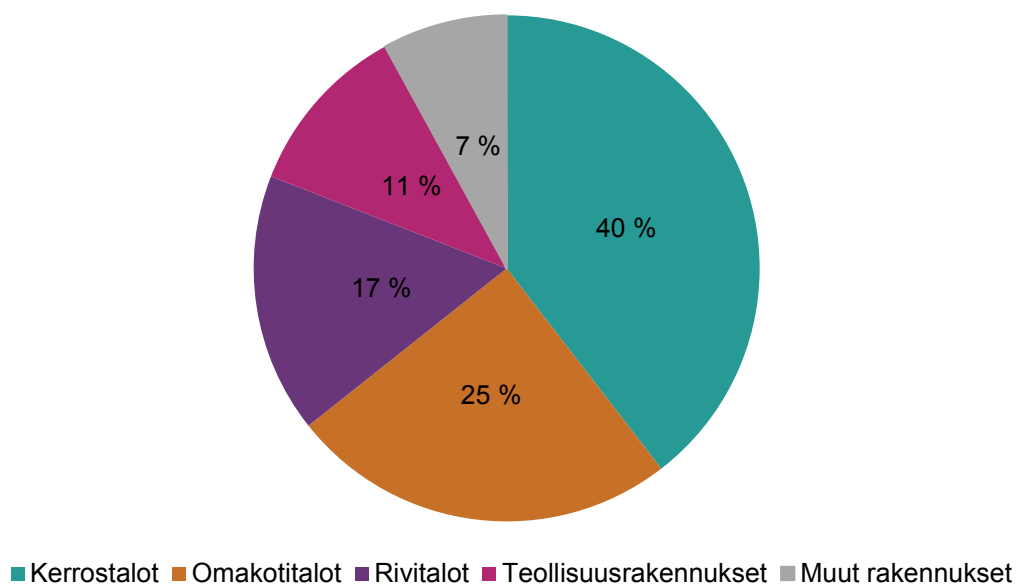
### **3.2 Valuma-alueiden vedenkulutus**

Alueiden vedenkulutuksia on syytä tarkastella, sillä veden käyttö vaihtelee riippuen kullattajatyypeistä. Tutkitulla alueella on neljä eri valuma-aluetta: Ämmäsuon, Kauklahden, Muulon ja Saunalahden valuma-alueet. Valuma-alueella tarkoitetaan tässä sitä maa-alaa, jolta vesi voi virrata pinta-valuntana jätevesipumppaamolle tai sille johtavalle viemärille. Valuma-alue siis määrittelee sen alueen, jolta on mahdollista päätyä hulevesiä jätevesiverkostoon ja sitä kautta pumppaamolle. Koska yläjuoksun jätevesipumppaamon vesi virtaa alajuoksun pumppaamolle, sisältää alajuoksun pumppaamon valuma-alue myös kaikki yläjuoksun valuma-alueet. Jotta pumppaamoiden ominaisuuksia voitaisiin vertailla keskenään paremmin, on alajuoksun valuma-alueista poistettu yläjuoksun valuma-alueet. Saatuja uusia alueita kutsutaan tässä työssä osavaluma-alueiksi. Alla olevissa kuvissa 4-10 on esitelty sekä koko tutkitun alueen että osavaluma-alueiden ominaisuuksia. Kuvaajista on kuitenkin jätetty pois Ämmäsuon valuma-alue, sillä siellä ei ole jätteenkäsittelykeskuksen lisäksi muita vedenkäyttäjiä.

Vettä käyttävät kuvan 4 perusteella Ämmäsuon alajuoksulla sijaitsevilla tutkituilla valuma-alueilla eniten kerrostalot, joiden jälkeen kulutuksessa seuraavat omakotitalot, rivitalot ja teollisuusrakennukset. Lopun veden käyttävät esimerkiksi opetusrakennukset, varastot ja hoitoalan rakennukset. Kaikilla tutkituilla valuma-alueilla on pääasiassa kotitalousasiakkaita, mutta Kauklahdessa on tämän lisäksi runsaasti teollisuutta. On kuitenkin

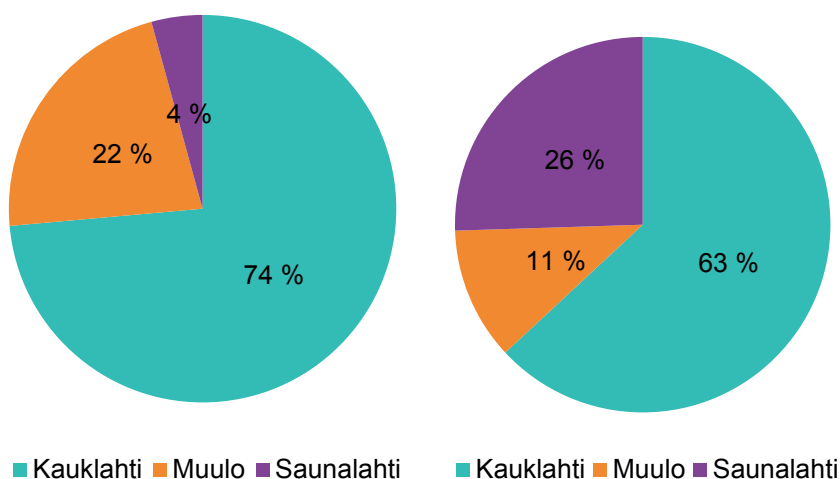


huomattava, että vedenkulutus-taulukko on tehty puhtaan veden kulutusarvioista ja esimerkiksi teollisuudessa saattaa olla sellaista toimintaa, joka ei palauta kaikkea jätevettä viemäriverkostoon tai palautuksessa voi olla viivettä.



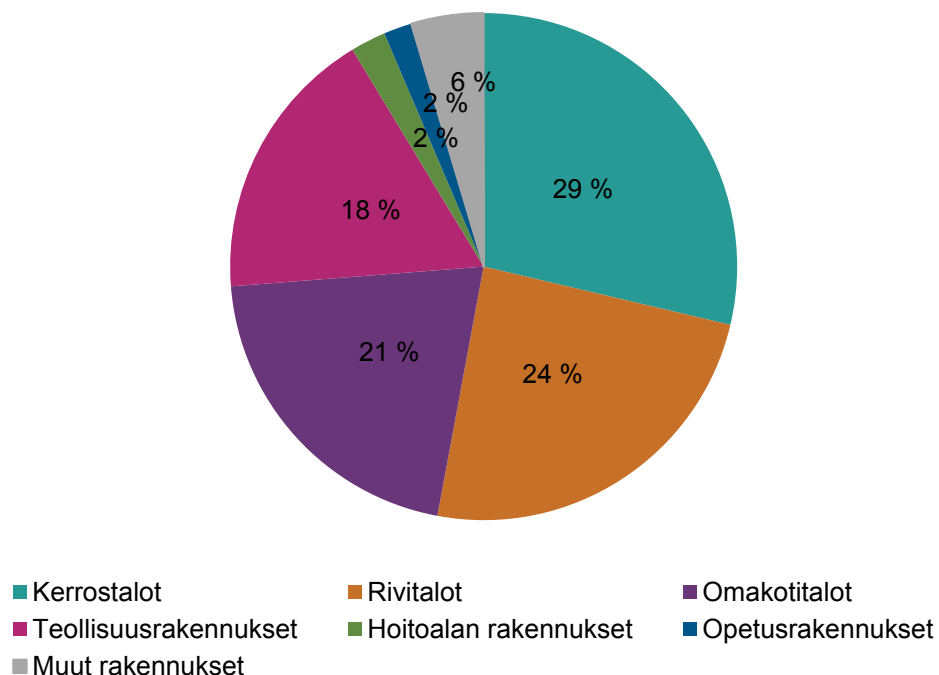
Kuva 4: Kulutettu vesi käyttäjätyypeittäin

Valuma-alueista Kauklahti on pinta-alaltaan suurin ja siellä on suurin vedenkulutus (kuvat 5 ja 6). Muulo seuraa Kauklahtea koossa, mutta vedenkulutuksessa se jää Saunalahtea pienemmäksi.



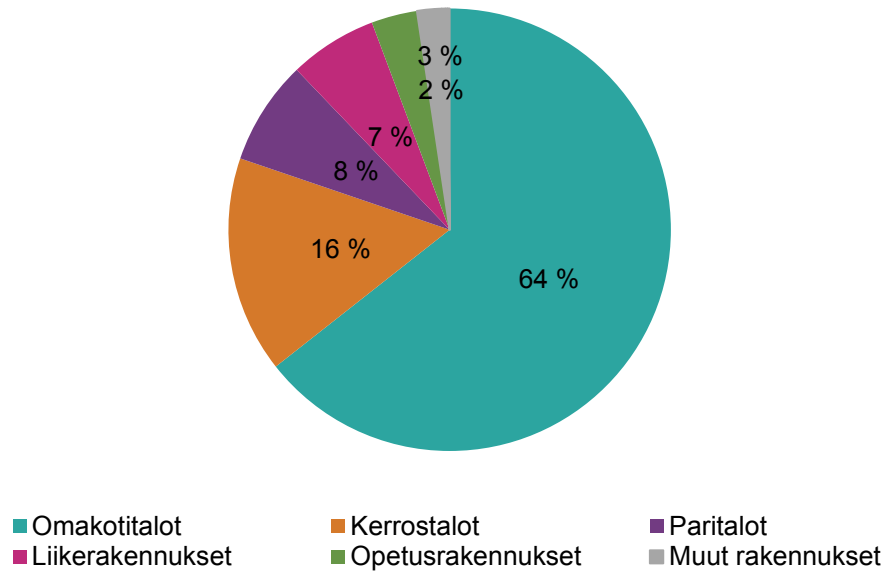
Kuva 5: Osavaluma-alueiden pinta-alat Kuva 6: Vedenkulutus

Kolmesta eri valuma-alueesta vain Kauklahden jätevesipumppaamon alueella on teollisuusasiakkaita, kuten kemianteollisuutta. Niiden vedenkulutuksen osuus on neljänneksi suurin asuinrakennusten jälkeen (kuva 7). Alueella onkin teollisuuden ohella lähinnä asutusta, jonka suurin vedenkuluttajaryhmä on kerrostalot. Kerrostalojen lisäksi Kauklahdessa on omakotitaloja sekä tutkittujen osavaluma-alueiden suurin osuus rivitaloista. Arvioitu vedenkulutus on jakautunut melko tasaisesti kerrostalojen, rivitalojen, omakotitalojen ja teollisuusrakennusten välille. Koska Kauklahti on pinta-alaltaan suuri alue, on siellä teollisuuden ja asutuksen lisäksi muitakin kuluttajatyyppejä, kuten liike-, varasto ja kokoontumisrakennuksia. Kauklahdesta tulevat jätevedet ovat siis pääasiassa kotitalous-jätevesiä, mutta niissä on mukana suhteellisen paljon teollisuuden jätevesiä.



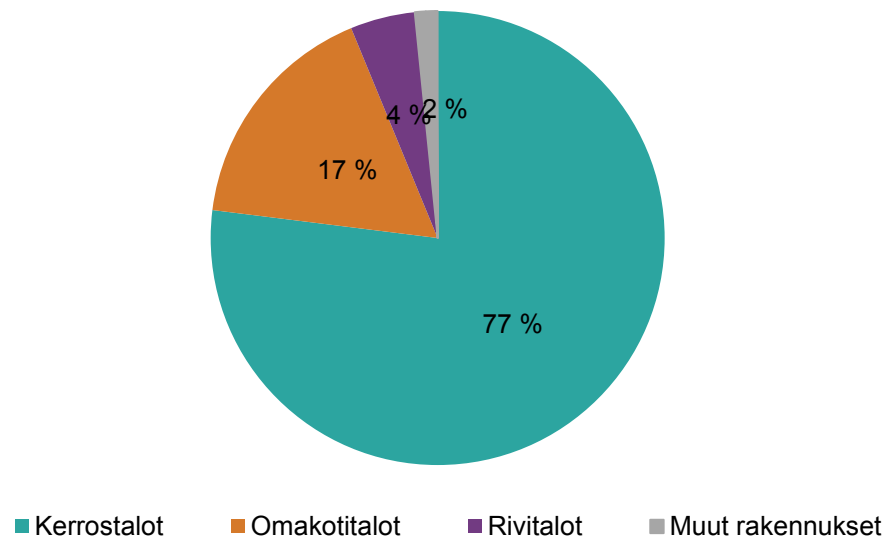
*Kuva 7: Kauklahden vedenkulutus*

Kauklahden jälkeisellä osavaluma-alueella Muulossa on lähes pelkästään asutusta (kuva 8). Muulo on tutkituista alueista pientalovoittoisin ja alueen suurin vedenkuluttajaryhmä on omakotitalot.



*Kuva 8: Muulon vedenkulutus*

Saunalahti on valuma-alueista pienin. Muulon tapaan myös Saunalahti on lähinnä asuin- aluetta ja siellä suurin vedenkuluttaja on kerrostalot (kuva 9). Kerrostalojen lisäksi vettä kuluttavat omakotitalot ja rivitalot.



*Kuva 9: Saunalahden vedenkulutus*

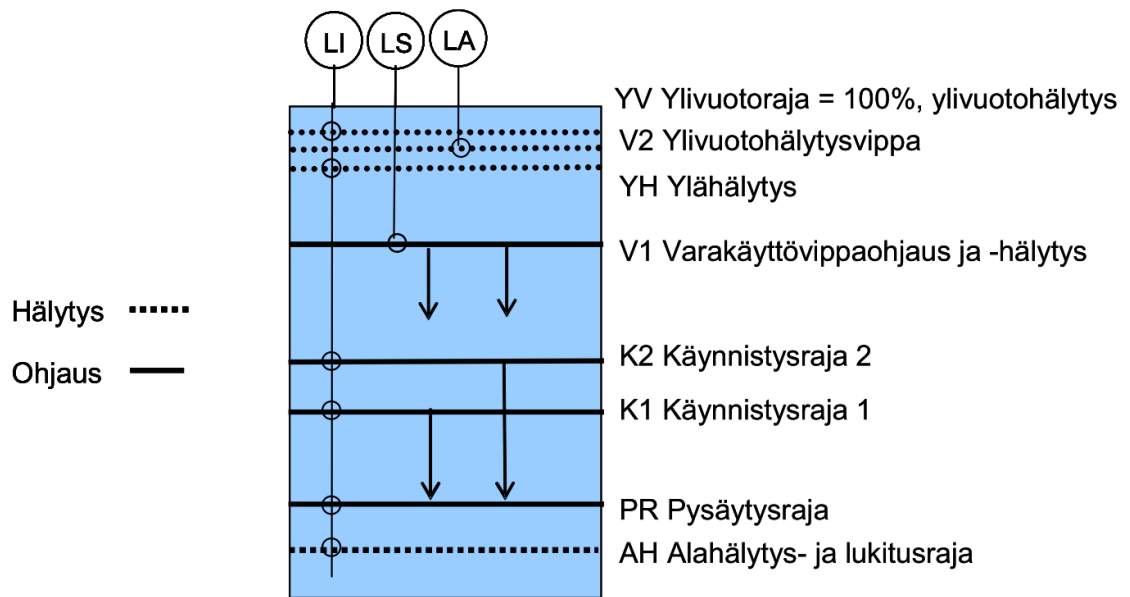
## 4 Lähtötiedot

Lähtötietoina tutkimuksessa käytettiin sadetietoa, pumppaamoiden virtaamatietoa ja meriveden korkeutta. Sadetietoa ja pumppaamoilta saatua virtaama-aineistoa oli käytettävissä kahden vuoden ajalta vuosilta 2013 ja 2014. Meriveden korkeustiedot ovat saatavissa Ilmatieteen laitoksen avoimen datan palvelusta vuodesta 1971 lähtien.

Tutkimuksessa käytetty sadetieto on valuma-alueittain määritettyä, sadetutkasta sademittarisovituksen kautta saatua tuntikohtaista dataa. Valuma-alueiden rajauksessa havaittiin työn aikana joitakin virheitä, jolloin kullekin alueelle määritetyissä sadannoissa saattaa olla myös pieniä virheitä. Sadantaestimaatit ovat kuitenkin lähtökohtaisesti selvästi parempia kuin esimerkiksi alueiden sadannan arviointi yksittäisellä, valuma-alueiden ulkopuolella sijaitsevalla sademittarilla.

### 4.1 Pumppaamojen toiminta ja virtaamamittaus

HSY:n pumppaamoilla virtaama määritetään yleensä joko astiamittauksella tai taajuusmuuntajalla. Kummassakin tapauksessa pumppaamoilla mitataan vedenpintaa pumppukaivossa ja pumppujen käynnistymistä säädellään pinnankorkeuden mukaan. Normaalisti pumppaamoilla on kaksi pumppua, joista ensimmäinen käynnistyy kuvan 10 mukaan ensimmäisellä käynnistysrajalla ja toinen toisella käynnistysrajalla. Kumpikin pumppu pysähtyy pysäytysrajalla. Ne pysäytetään automaattisesti alahälytysrajalla ja ylähälytysrajalla ne käynnistetään. Pumppaamoilla mitataan aikaa, jolloin pinnankorkeus ylittää ylivuotorajan. Tiedot tallennetaan sekä kumulatiivisina että päiväkohtaisina. Pumppaamo voi antaa myös tulvahälytyksen. Pumppuja voidaan käyttää yhtä aikaa suurien virtausten aikana ja toisen mennessä epäkuuntoon toinen korvaa sen automaattisesti. Pumput toimivat automatisointiasetustensa mukaan. Tiedot lähetetään valvomoon ja ne näkyvät erillisessä raportointijärjestelmässä.



Kuva 10: Pumppaamon ajologiikka, (Finnish Consulting Group 2012)

Virtaaman mittaukseen käytetään astiamittausta pumppaamoilla, jotka eivät ole kiinni runkolinjassa. Siinä tilavuutta (1) mitataan yhdistämällä pumppaamon lieriön tilavuuskaava (2) kolmannen asteen yhtälön (3) kanssa. Myös vain toinen näistä voi olla käytössä. Yhtälöissä  $h$  on pinnankorkeus metreissä,  $A$  on pohjan pinta-ala neliömetreissä ja  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ja  $d$  ovat tilavuuskäyrän sovitukselta saatuja vakioita. (Finnish Consulting Group 2012.)

$$V = V_1 + V_2 \quad (1)$$

$$V_1 = A * h * 1000 \quad (2)$$

$$V_2 = (((a * h + b) * h + c) * h + d) * 1000 \quad (3)$$

Tutkituilla runkopumppaamoilla virtausta ei kuitenkaan mitata astiamittauksella vaan taajuusmittareilla. Taajuusmittariohjatuilla pumppaamoilla virtaama lasketaan pumpun valmistajan määrittämän nimellistuottokäyrän mukaan, johon on määritetty pumpun pumppaama vesimäärä tietyssä aikayksikössä eri taajuuksille, nostokorkeuksille ja putkille. Tämän perusteella voidaan päätellä pumpattu vesimäärä, kun käytetty taajuus ja pumppaamon geometria tunnetaan. (Finnish Consulting Group 2012.)

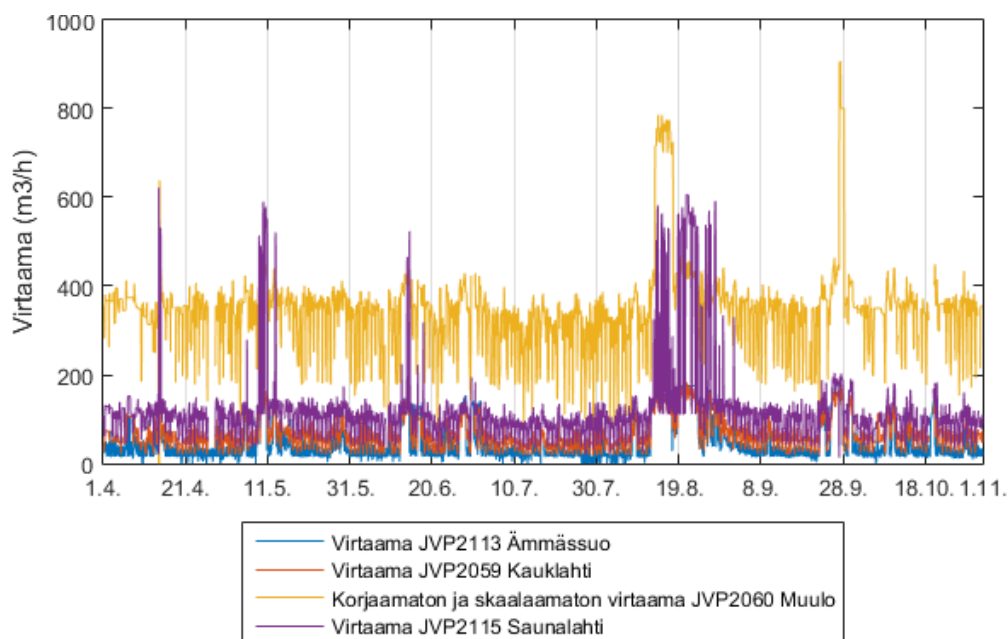
Nimellistuotto voi kuitenkin olla väärin määritetty, sen parametrit on saatettu asettaa väärin tai pumpun teho on voinut käytön ja ikääntymisen seurauksena muuttua. Nimellistuottokäyrän arvion oikeellisuuden voi tarkistaa mittaamalla virtaamaa myös toisella tapaa,

esimerkiksi astiamittauksella tai virtausmittarilla. Tässä mittaustavassa virtaamien suhteelliset arvot ovat yleensä oikeita, mutta absoluuttisten arvojen paikkansa pitävyys riippuu nimellistuottokäyrästä. Taajuusmuuttajalla toimivia pumppuja voidaan ajaa joko va-kiotaajuudella tai taajuutta voidaan vaihdella tulevan vesimäärän mukaan. Runkolinjassa sijaitsevat pumppaamot ovat käynnissä käytännössä koko ajan.

## 4.2 Tutkitut pumppaamot

Ensimmäinen tarkastelluista pumppaamoista sijaitsee Ämmässuolla, josta viemäri linja alkaa. Sieltä on saatu tuntikohtaista dataa vuodelta 2014 ja päiväkohtaista dataa vuodelta 2013. Muilta pumppaamoilta on saatavissa tuntikohtaista virtaamatietoa usealta vuodelta. Ensimmäinen, toinen sekä neljäs jätevesipumppaamo, eli pumppaamot Ämmässuo, Kauklahti ja Saunalahti, tuottavat luotettavaa virtaamatietoa. Niiden arvojen on varmistettu HSY:n toimesta olevan oikeita noin muutaman litran per sekunti tarkkuudella.

Kuten jo Tutkittava alue -kappaleessa todettiin, kolmas jätevesipumppaamo eli Muulo, tuottaa suurempia tuloksia kuin alajuoksun pumppaamo Saunalahti. Sen absoluuttiset tulokset eivät siis ole luotettavia. Muulon virtaama-arvojen käyrä näyttää kuitenkin olevan säännöllinen ja normaalin vedenkulutuskäyrän mukainen eli arvot ovat luotettavia suhteessa toisiinsa. Valituissa data-analysimenetelmissä absoluuttisten arvojen paikkansa-pitävyydellä ei ole kuitenkaan merkitystä, kunhan arvojen vaihtelut ovat suhteellisesti oikeita. Tutkimusjaksolla mitatut virtaamat on esitetty kuvassa 11.

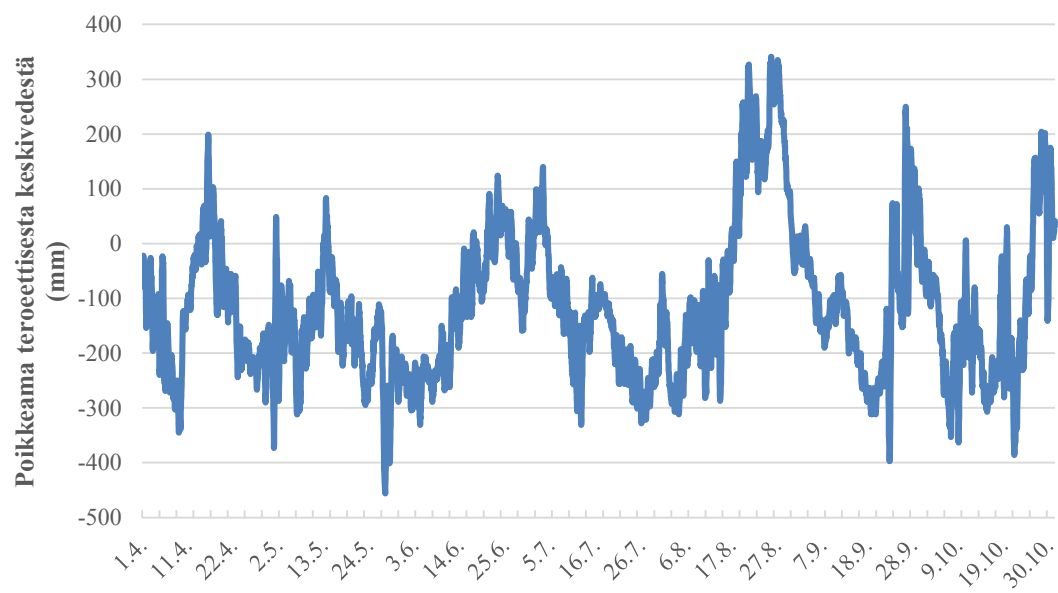


*Kuva 11: Jätevesipumppaamoiden mitatut virtaamat 1.4.2014–31.10.2014*

Liian suuri virtaama Muulon jätevesipumppaamolla johtui siitä, että pumppaamoa käytettiin tuolloin väärällä taajuudella. Pumppaamon jätevesivirtaama on määritelty virheellisesti käytetylle taajuudelle, mistä johtuen arviot virtaamamääristä ovat menneet pieleen. Liian alhainen taajuus aiheutti pumppujen toimimisen tehottomasti ja Muulon jätevesipumppaamo kulutti sähköä lähes tuplasti verrattuna Saunalahden pumppaamoon.

### 4.3 Meriveden korkeus

Ilmatieteen laitoksella on vuodesta 1971 asti avointa dataa meriveden tuntikohtaisista korkeushavainnoista. Nämä havainnot on ilmaistu poikkeamina teoreettisesta keskivedestä, joka tarkistetaan jokaiselle vuodelle. Ilmatieteen laitos seuraa meriveden korkeutta mittauskaivoissa kelluvilla uimureilla, joiden liikkeet rekisteröidään. Kaivoilla pyritään poistamaan aallokon vaikutus mittauksiloksiin. Mittausasemia kutsutaan mareografeiksi. Niiden todellinen mittaustarkkuus on alle 1 cm laskennallisen tarkkuuden jäädessä alle 10 cm:iin. (Ilmatieteen laitos 2015 d, Ilmatieteen laitos 2015 b). Tässä diplomityössä käytetty meriveden korkeustieto on mitattu Helsingin Kaivopuiston mareografilla, sillä se sijaitsee lähimpänä tutkittavaa aluetta. Meriveden teoreettinen keskivesi oli siellä vuonna 2014 N2000 korkeusjärjestelmässä 200 mm (Ilmatieteen laitos 2015 a). Tutkimusjakson aikana mitatut meriveden korkeudet on esitetty keskiveden poikkeamina kuvassa 12.



*Kuva 12: Meriveden korkeus Kaivopuistossa Helsingissä 1.4.2014–31.10.2014*



## 5 Data-analyysi

Data-analyysiä varten Muulon virtaamaa pienennettiin ja sen virheellinen jakso korjattiin. Puuttuvat virtaamatiedot interpoloitiin tunnettujen virtaamien avulla. Dataa analysoitiin tekemällä sateille ja jätevesivirtaamille ristikorrelaatiotestit niiden ajallisen suhteen tutkimiseksi, minkä jälkeen niille johdettiin korrelaatiokertoimet saatujen viipymien avulla. Korrelaatiokertoimien lisäksi jätevesivirtaamille tehtiin lineaariset regressioanalyysit, joilla pyrittiin selittämään jätevesivirtaama sateiden, yläjuoksun virtaaman ja meriveden korkeuden avulla.

### 5.1 Visuaalinen analysointi

Pumppaamoiden valuma-alueet sisälsivät tässä vaiheessa vielä yläjuoksun pumppaamoiden valuma-alueet eli tutkimusalueen viimeisenä runkoviemäriässä sijaitsevan jätevesipumppaamon Saunalahden valuma-alue sisälsi myös Ämmäsuon, Kaukalahden ja Muulon valuma-alueet. Kaikille valuma-alueille satanut vesimäärä laskettiin kuutioina pinta-alan avulla.

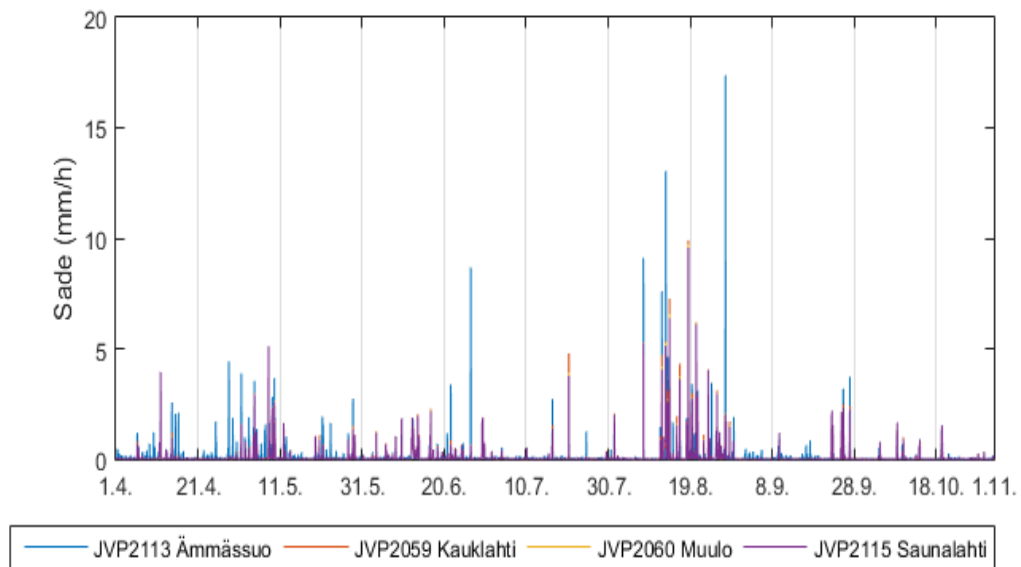
Pumppaamoille laskettiin myös osavaluma-alueet, joihin ei kuulu yläjuoksulla olevien pumppaamoiden sisältämät alueet. Näille osavaluma-alueille satanut vesi voi vaikuttaa vain yhdellä pumppaamolla. Erottelemalla sateet jokaiselle osavaluma-alueelle voidaan arvioida vuotojen määriä ja lähteitä. Osavaluma-alueelle satanut vesimäärä saatiin vähentämällä valuma-alueen kuutioina lasketusta sademäärästä yläjuoksun valuma-alueen osuus. Kun sademäärä tämän jälkeen jaettiin osavaluma-alueen pinta-alalla, saatiin tulokseksi osavaluma-alueen tuntikohtainen sademäärä millimetreinä.

Kaikille tutkituille pumppaamoille muodostettiin viikontästä ja tunnista riippuva keskiarvoinen kuivan ajan virtaama. Keskiarvoisella kuivan ajan virtaamalla voitiin visuaalisesti arvioida sateiden vaikutusta pumpattaviin jätevesimääriin. Kuiviin kausiin huomioitiin ajanjaksot, jotka koostuivat vähintään kolmesta peräkkäisestä kuivasta päivästä. Kuivaksi päiväksi luokiteltiin päivät, joita edeltävänä vuorokautena oli satanut alle 0,3 mm jokaisena tuntina. Ilmatieteen laitos (2015 c) käyttää poutasään kriteerinä 0,3 mm sadetta vuorokaudessa. Tässä työssä käytettiin kuitenkin kuivan päivän kriteerinä suurempaa sateen määrää eli 0,3 mm tunnissa, sillä vain pieni osa noin pienistä sateesta päätyy jätevesiviemäriin. Näin ollen pienillä sateilla ei yleensä ole käytännössä vaikutusta

jätevesivirtaamaan. Virtaama- ja sadekäyristä varmistettiin visuaalisesti, että tämän koluokan sateilla ei ollut merkittävää vaikutusta virtaamaan. Lisäksi kuivien päivien piti olla kokonaisia.

Jos esimerkiksi 11.7.2014 olisi klo 13 satanut 0,5 mm, 12.7.2014–15.7.2014 mitattu sade olisi ollut koko ajan alle 0,3 mm ja 16.7.2014 olisi satanut yli 0,3 mm, niin 13.7.2014–15.7.2014 olisi luokiteltu hyväksyttäväksi kuivaksi jaksoksi. Kuivan jakson kriteerinä oli suhteellisen pitkä yhtäjaksoinen vähäsateinen aika ennen hyväksyttyä kuivaa päivää, sillä jätevesipumppaamoiden valuma-alueet ovat suuria ja niiltä vuotavalla sade- ja hulevedellä voi kestää kauan kulkea pumppaamoiden kautta. Kuivien päivien sateiden arviointiin käytettiin osavaluma-alueille laskettuja sademääriä.

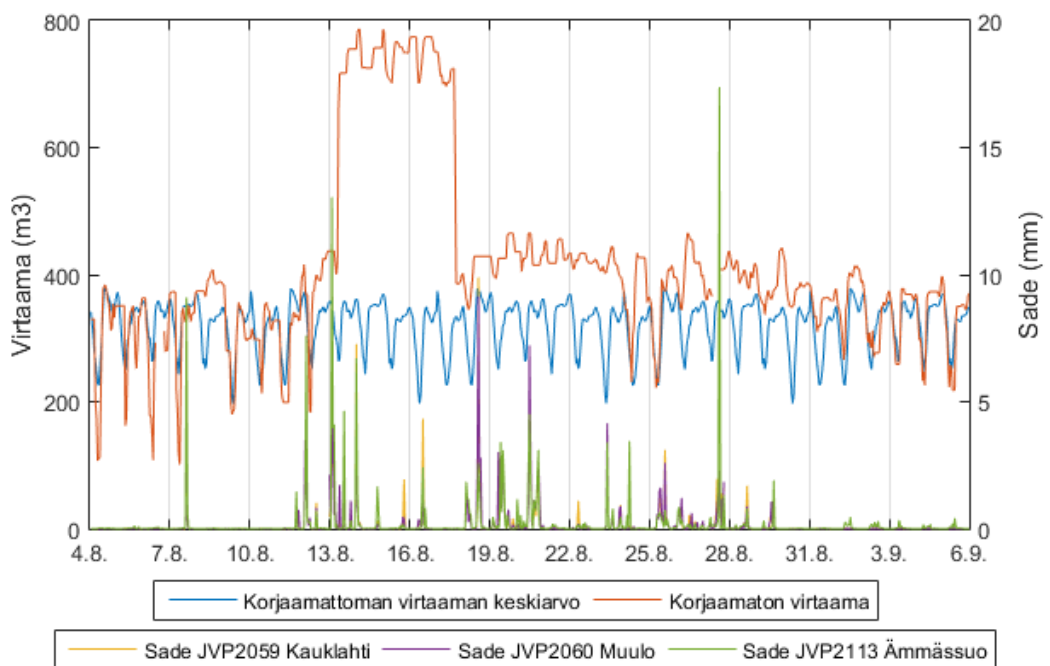
Sateisiksi tutkimusjaksoiksi valittiin 26.4.2014–15.5.2014 ja 4.8.2014–5.9.2014, koska ensimmäiselle jaksolle sattui hyvin keskimääräisiä sateita ja toiselle sateiselle ajanjaksolle taas osuivat vuoden suurimmat sateet. Tutkimusjaksojen alku- ja loppupäihin jäi kuivat kaudet, joiden aikana jätevesivirtaamat ehtivät laskea normaalille tasolle. Kuvassa 13 on esitetty kaikkien valuma-alueiden sateet koko tutkimusjaksolta.



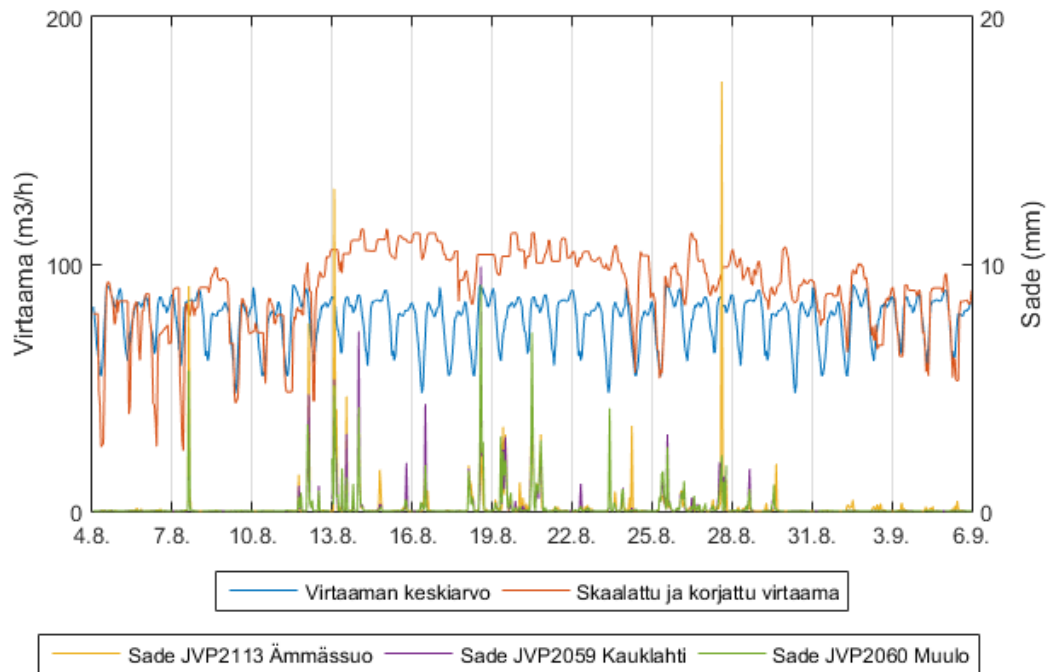
*Kuva 13: Osavaluma-alueiden sateet 1.4.2014–31.10.2014*

Muulolla oli liian suurten virtaamien lisäksi jakso, jossa sen virtaamien arvot hyppäsivät hetkellisesti liian suuriksi (13.8.2014–17.8.2014 kuvassa 14). Tämä virhe alkoi 13.8.

kello 7 ja jatkui 17.8. kello 17 asti eli se osui juuri jälkimmäisen sateisen jakson kohdalle. Virhe korjattiin kertomalla tämän virhejakson virtaamat 0,6:lla, jolloin virtaama laski silmämääräisesti muun virtaaman kanssa samalle tasolle. Tämän virhejakson lisäksi virtaamien käyttäytymistä tutkittiin myös ensimmäisen sateisen jakson aikana ja näin tuloksista saatiin luotettavampia. Korjatut arvot eivät vaikuta kuivan ajan keskiarvoisiin jätevesivirtaamiin, sillä korjaukset tehtiin sateiselle jaksolle ajoittuneeseen häiriöön, kun taas keskiarvot on arvioitu kuivien päivien perusteella. Muulon korjatussa virtaamassa (kuva 15) alkuperäisestä mitatusta virtaamatiedosta puuttuneet virtaamatiedot on interpoloitu lineaarisesti.

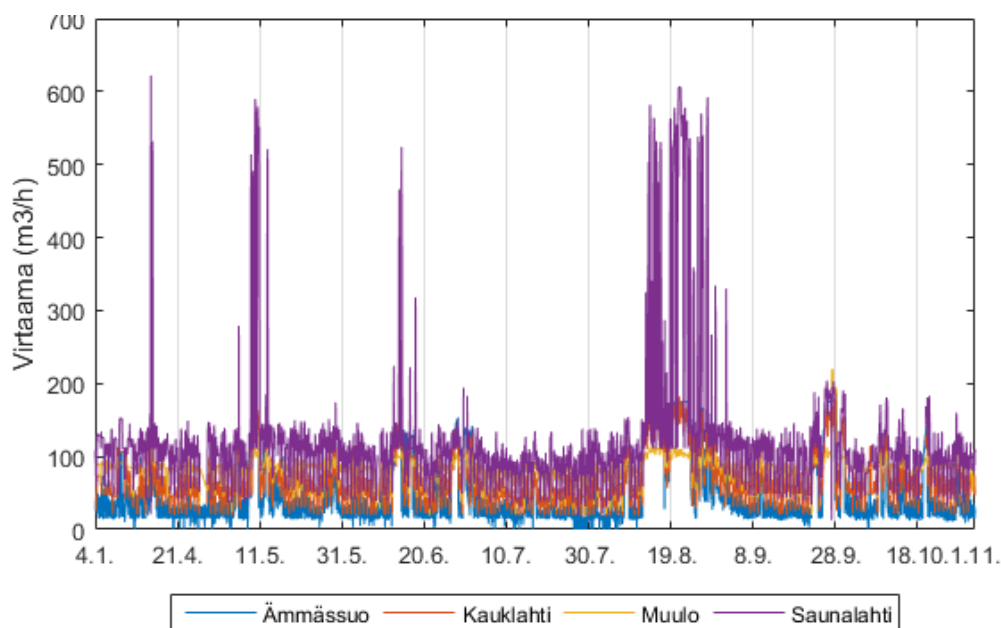


*Kuva 14: Muulon virtaama 4.8.2014–5.9.2014. Virheelliset arvot näkyvät 13.–19.8. välillä*



*Kuva 15: Muulon virtaama 4.8.2014–5.9.2014 virhejakson (13.–19.8) korjaamisen jälkeen*

Koska Muulon jätevesivirtaama oli suurempi kuin alajuoksun virtaama, oli se skaalattava pienemmäksi. Visuaalisesti sopivat virtaamamäärät saatiin kertomalla kaikki Muulon virtaamien määrät 0,242:lla, jolloin ne olivat pääosin suurempia kuin yläjuoksun Kauklahtien jätevesipumppaamon, mutta pienempiä kuin alajuoksun Saunalahden jätevesivirtaamat. Skaalatut virtaamat on esitetty kuvassa 16.



*Kuva 16: Jätevesivirtaamat 1.4.2014–31.10.2014, joista Muulon arvot ovat skaalatut ja virheellinen jakso (13.-19.8) korjattu*

Skaalaus toimi pääsääntöisesti hyvin, mutta sateisella ajalla Ämmässuon ja Kauklahtien virtaamat ovat tämän jälkeen usein suurempi kuin Muulon, vaikka ne sijaitsevat Muulon yläjuoksulla. Koko tutkimusajalle sovitettuna skaalaus toimi kuitenkin hyvin. Se, että skaalaus ei toiminut kaikille havainnoille, kertoo siitä, että virtaamamittauksissa saattaa olla virtaaman suuruudesta riippuvia virheitä. Tällöin tietyllä luvulla kertominen ei anna kaikille havainnoille lähellä todellista tapahtumaa olevaa arvoa.

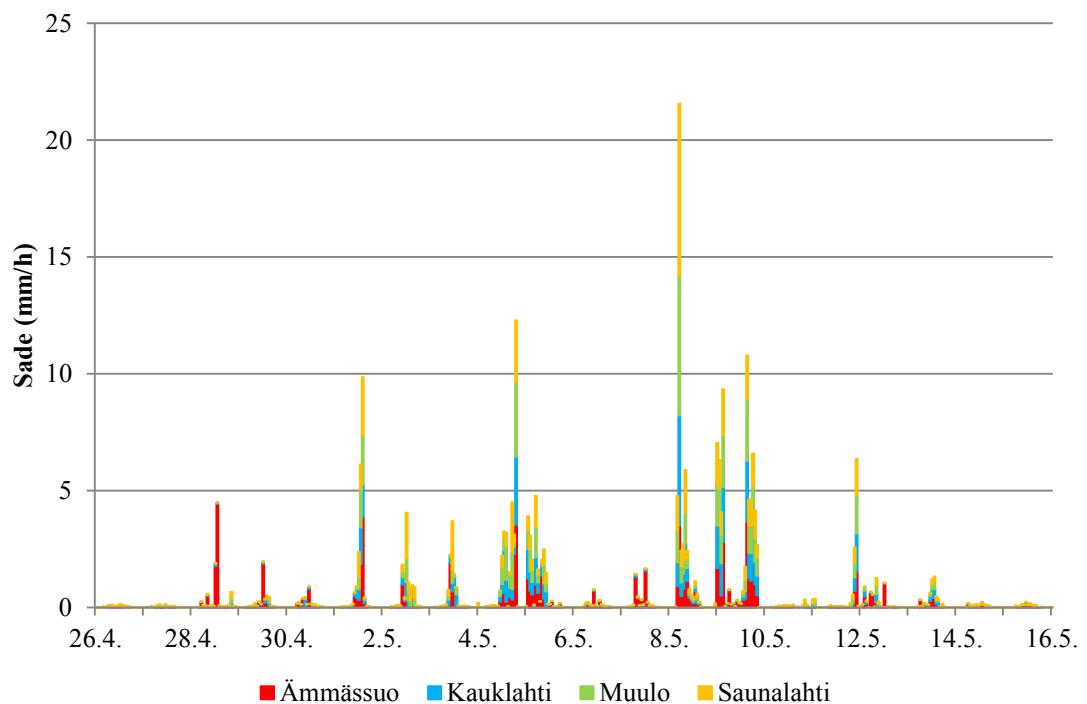
## 5.2 Ristikorrelaatio

Lähtötietojen käsittelyn jälkeen virtaamille ja sateille tehtiin ristikorrelaatiotestit ja lineaariset korrelaatiotestit. Kaikkien jätevesipumppaamoiden virtaamista muodostettiin ristikorrelaatiot niihin vaikuttavien osavaluma-alueiden sateiden kanssa. Ristikorrelaatio vertaa sateen ja virtaaman ajallista yhteyttä ja kertoo kuinka pitkällä viiveellä sade todennäköisimmin nostaa virtaamaa jätevesipumppaamolla. Ristikorrelaatiosta saadaan siis eroteltua sateen viive sadetapahtumasta kohonneeseen virtaamaan jätevesipumppaamolla.

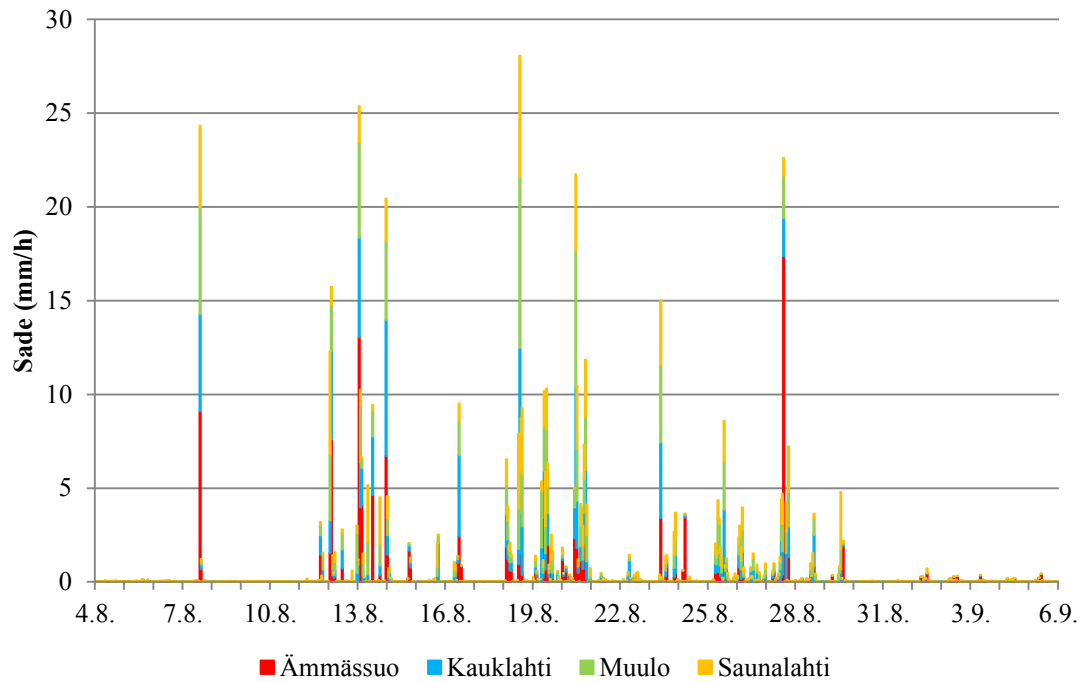
Sateina käytettiin osavaluma-alueiden sateita, jotta saataisiin eroteltua eri runkoviemäri-  
välien vuotavuus. Esimerkiksi Ämmässuon valuma-alueen vuoto- ja hulevedet voivat

päätyä vain Ämmässuon jätevesipumppaamolle laskeviin viemäriin. Samoin Kaukalahden osavaluma-alueen sade voi päätyä jätevesiviemäriin vain Ämmässuon ja Kaukalahden jätevesipumppaamoiden välillä. Ristikorrelaatiota varten virtaamista piti interpoloida puuttuvat arvot. Näitä oli kuitenkin vain pieni osa (noin 2 %) kaikista arvoista, joten niiden interpolointi ei vaikuttanut merkittävästi tuloksiin.

Virtaamille ja niihin vaikuttaville sateille muodostettiin ristikorrelaatiot koko tutkitulle ajanjaksolle (1.4.2014–31.10.2014) sekä kahdelle sateiselle ajanjaksolle (26.4.2014–15.5.2014 ja 4.8.2014–5.9.2014). Ensimmäiselle sateiselle jaksolle (26.4.2014–15.5.2014) osui keskimääräisiä sateita, kun taas toisen kauden (4.8.2014–5.9.2014) sateet olivat vuoden suurimpia (kuvat 17 ja 18). Kaksi eri kautta olivat tutkimusta varten tarpeellisia myös siksi, että toisella sateisella tutkimusjaksolla Muulon virtaamassa oli skaalauksen lisäksi muita virheitä. Kahdella sateisen kauden tarkastelulla pyrittiin vahvistamaan Muulon tulokset.



Kuva 17: Osavaluma-alueiden sateet 26.4.2014–15.5.2014



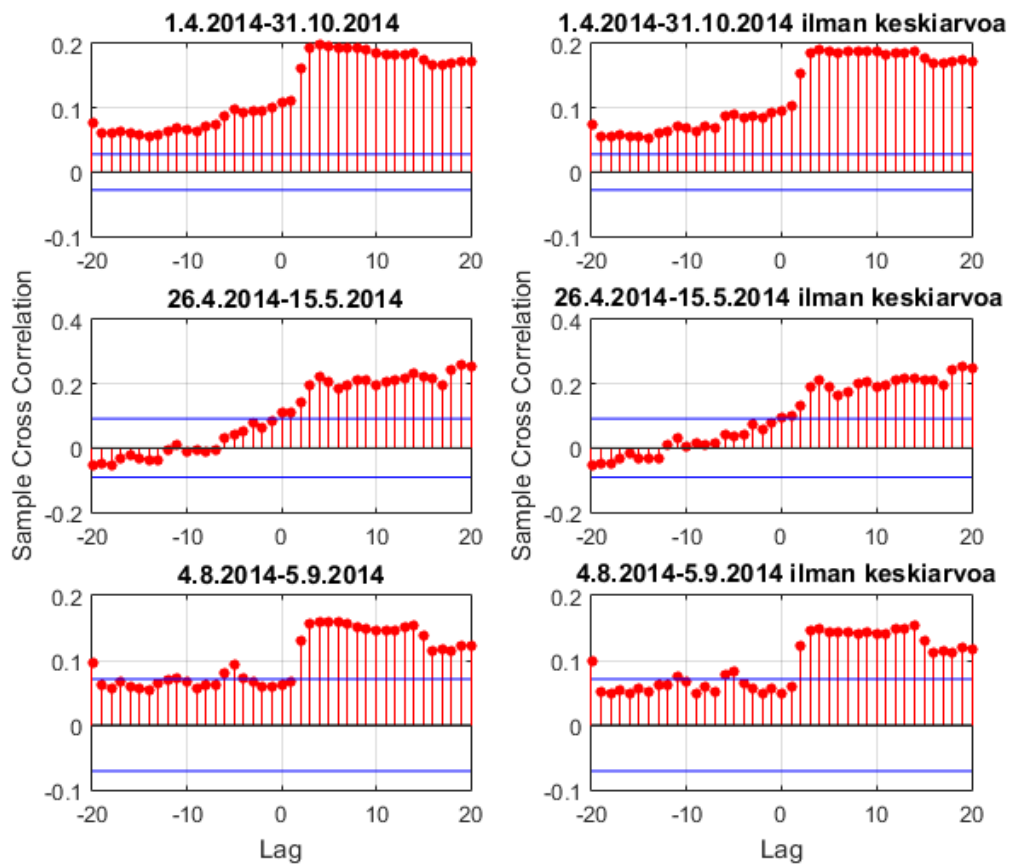
Kuva 18: Osavaluma-alueiden sateet 4.8.2014–5.9.2014

Keskikokoisilla sateilla kestää luultavasti pidemmän aikaa maaperässä päätyä jätevesipumppaamolle kuin suurilla sateilla. Tämä johtuu siitä, että vesi etenee vedellä kyllästyneessä maaperässä nopeammin kuin kuivassa, kun huokoset eivät ime vettä itseensä ja suurempi osa vedestä kulkeutuu pintavaluntana suoraan pumppaamolle. Myös pitkäkestoisilla ja tiheillä sateilla on sama vaikutus virtausnopeuteen sillä ne kyllästävät maaperän vedellä. Kun sade- ja hulevettä on paljon, vesi voi kulkea myös maaperän huokosten oikoreittejä pitkin pumppaamolle.

Ristikorrelaatiot tehtiin kummallekin sateiselle jaksolle sekä koko tutkimuskaudelle myös niin, että mitatusta virtaamasta oli vähennetty kuivan sään keskiarvoinen virtaama. Vähentämällä keskiarvoinen virtaama pyrittiin häivyttämään virtaamista vuorokausivaihtelun vaikutus ja saamaan paremmin esiin sadetapahtumat virtaamamääristä. Jätevesivirtaama on kuitenkin vaihteleva eikä sen absoluuttisesta määrästä verrattuna keskiarvoon voida päätellä varmasti vuotovesien osuutta.

Kaikkia jätevesivirtaamia verrattiin niiden osavaluma-alueiden sateisiin sekä yläjuoksun pumppaamojen sateisiin. Kuvissa 19-22 y-akselin sample cross correlation kertoo korrelaatiokertoimen ja x-akselin lag tarkoittaa sateen viivettä tunneissa. Huippukertoimen kohdalla sateen vaikutus jätevesivirtaamaan on suurin.

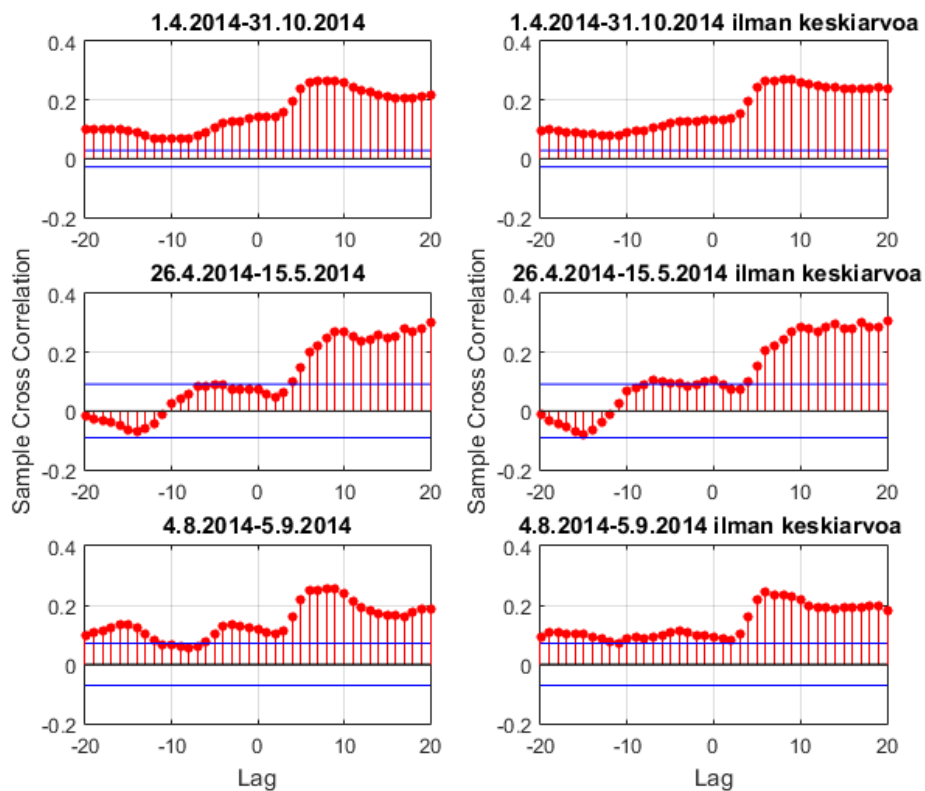
Kuvan 19 perusteella sateen aiheuttama virtaama alkaa näkyä Ämmässuon jätevesipumppaamolla kolmesta neljään tuntia sadetapahtuman jälkeen. Lyhyt viive sadetapahtumasta virtaaman kasvuun johtuu Ämmässuon osavaluma-alueen pienestä koosta. Samasta syystä viiveessä ei ole suurta eroa keskikokoisten ja suurten sateiden välillä. Muiden valuma-alueiden viiveisiin verrattuna Ämmässuon tasot pysyvät korkeina pitkään, mikä johtunee siitä, että siellä sadevesi johdetaan altaisiin, joista se pumpataan viemäriin mahdollisimman tasaisesti. Ristikorrelaatioiden tulokset ovat melko samat mitatuille virtaamille ja virtaamille, joista on poistettu kuivan sään keskiarvot. Näiden kuvaajien perusteella valittiin sadedatan viivytykseksi neljä tuntia.



Kuva 19: Ämmässuon ristikorrelaatiot

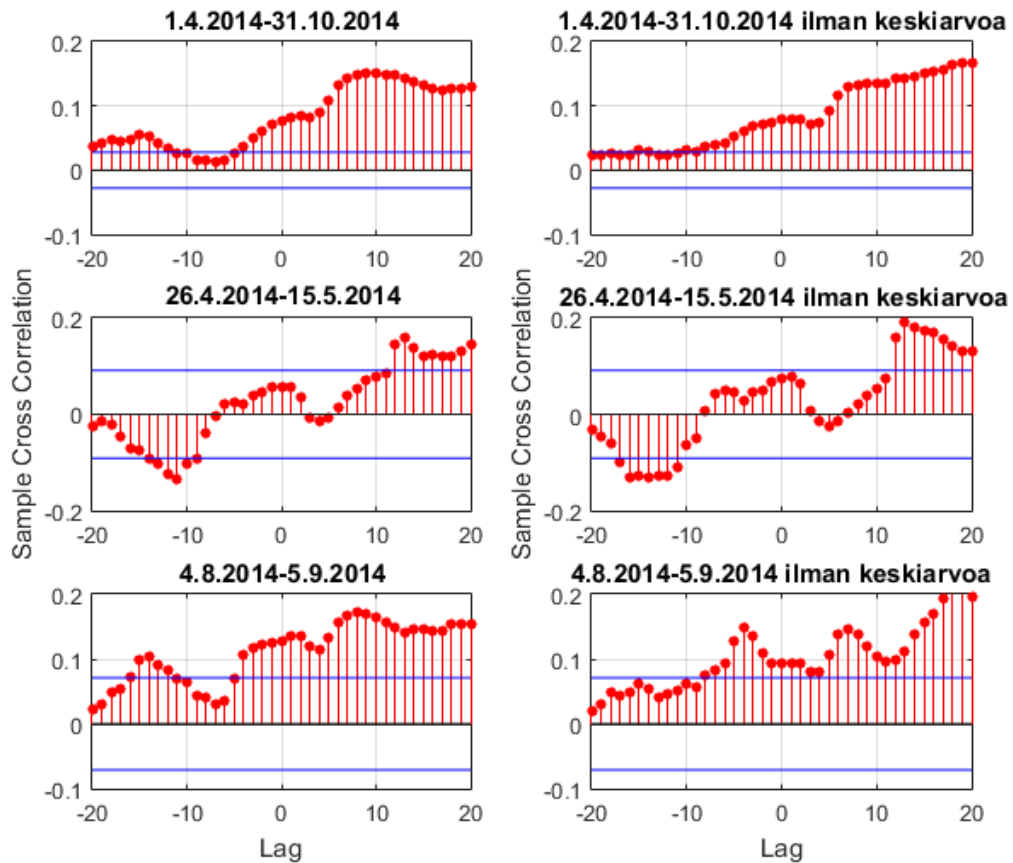


Kuvan 20 perusteella ensimmäisellä sateisella kaudella Kauklahden osavaluma-alueen sateen viive Kauklahden jätevesipumppaamolle on yhdeksän tuntia. Jälkimmäiselle sateiselle kaudelle viive on kuudesta kahdeksaan tuntia. Koko tutkimusjaksolle viipymä on kuudesta seitsemään tuntia. Kun jätevesivirtaamasta vähennetään kuivan kauden keskimääräinen virtaama, saadaan vastaaviksi ristikorrelaatioiden tuloksiksi kymmenen, kuusi ja kuusi tuntia.



*Kuva 20: Kauklahden jätevesivirtaaman ristikorrelaatio omaan sateeseensa*

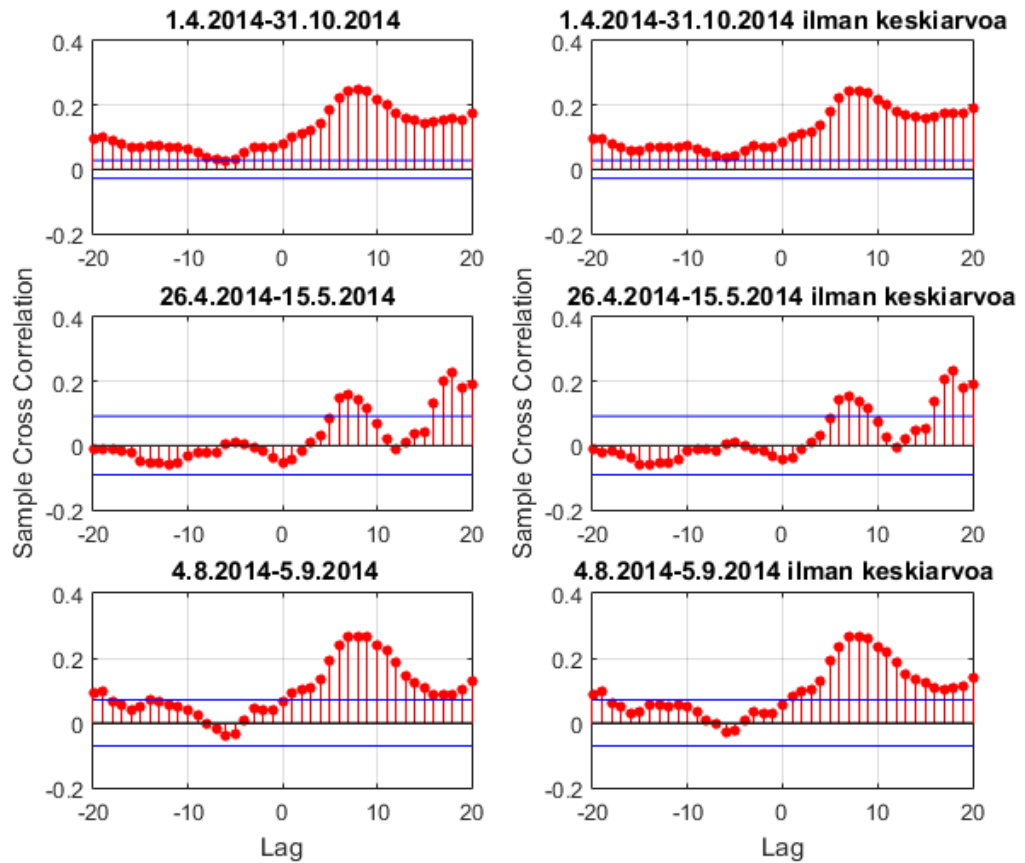
Kuvan 21 mukaan Muulon oma sade päätyi jätevesipumppaamolle koko tutkimusjakson ja toisen sateisen kauden aikana kahdeksassa tunnissa. Ensimmäisellä sateisella kaudella viive oli noin 13 tuntia. Muulon alueella erikokoisten sateiden viipymillä on eroa noin viisi tuntia. Kuivan kauden keskiarvosateen vähentämisellä on vain pieni vaikutus ristikorrelaatiotuloksiin.



**Kuva 21: Muulon jätevesivirtaaman ristikorrrelaatio omaan sateeseensa**

Saunalahden oma sade valuu jätevesipumppaamolle kahdeksan tuntia satamisen jälkeen (kuva 22). Saunalahden pienten sateiden viipymä on noin seitsemän tuntia. Suuret sateet sen sijaan saapuvat pumppaamolle tuntia aiemmin. Keskiarvon vähentäminen pienentää viipymää tunnilla sekä suurilla että koko tutkimusjakson sateilla.

Jostain syystä Saunalahden ristikorrrelaatioiden perusteella suurilla sateilla kestää suunnilleen yhtä kauan tai hieman kauemmin päätyä jätevesipumppaamolle kuin pienemmillä sateilla. Tämä on tuloksena epätavallinen, sillä yleensä suuret sateet päätyvät jätevesiverkostoon nopeammin pintavaluntana tai märän maan läpi. Kun maaperän huokokset ovat täyttyneet vedestä, kulkee vuoto- ja hulevesi nopeasti sen läpi. Odottamattomiin viipymiin on voinut vaikuttaa jokin tekijä, jota ei ole ollut mahdollista huomioida tässä työssä.



*Kuva 22: Saunalahden jätevesivirtaaman ristikorrrelaatio omaan sateeseensa*

Ristikorrrelaatiot tehtiin omien osavaluma-alueiden sateiden lisäksi myös kaikille yläjuoksun osavaluma-alueiden sateille. Näiden tulokset on esitetty taulukossa 1.

*Taulukko 1: Ristikorrelaatioiden tulokset mitatuille jätevesivirtaamille ja virtaamille, joista on vähennetty kuivan ajan keskiarvovirtaama*

	<b>Osavaluma-alue</b>	<b>Ilman keskiarvoa</b>	
<b>Jätevesipumppaamo</b>	<b>1.4.2014–31.10.2014</b>	<b>Viive (h)</b>	<b>Viive (h)</b>
<b>Ämmässuo</b>	Ämmässuo	4	4
<b>Kauklahti</b>	Ämmässuo	7	6
	Kauklahti	7	6
<b>Muulo</b>	Ämmässuo	9	7
	Kauklahti	8	7
	Muulo	8	7
<b>Saunalahti</b>	Ämmässuo	9	9
	Kauklahti	9	8
	Muulo	8	8
	Saunalahti	8	7
<b>26.4.2014–15.5.2014</b>			
<b>Ämmässuo</b>	Ämmässuo	4	4
<b>Kauklahti</b>	Ämmässuo	9	10
	Kauklahti	9	10
<b>Muulo</b>	Ämmässuo	12	13
	Kauklahti	13	13
	Muulo	13	13
<b>Saunalahti</b>	Ämmässuo	7	7
	Kauklahti	7	7
	Muulo	7	7
	Saunalahti	7	7
<b>4.8.2014–5.9.2014</b>			
<b>Ämmässuo</b>	Ämmässuo	4	4
<b>Kauklahti</b>	Ämmässuo	7	6
	Kauklahti	7	6
<b>Muulo</b>	Ämmässuo	8	7
	Kauklahti	7	7
	Muulo	8	7
<b>Saunalahti</b>	Ämmässuo	9	9
	Kauklahti	9	9
	Muulo	9	8
	Saunalahti	8	7

Ristikorrelaatiotulosten perusteella jätevesipumppaamoiden sateiden viiveissä ei ole suuria eroja. Eri valuma-alueiden sateiden viiveillä on korkeintaan tunti eroa seuraavaan valuma-alueen sateen viiveeseen. Voidaan siis olettaa, että suurin osa ajasta kuluu veden päätymiseen jätevesiverkostoon, kun taas vuoto- ja huleveden eteneminen viemärissä on nopeaa. Ainakaan sateella viipymä viemärissä ei ole pitkä.

Monia koko tutkimusjaksolle tehtyjä ristikorrelaatiotuloksia dominoivat suuret sateet, joilla on suurempi vaikutus virtaamaan. Tämän takia ristikorrelaatiotulokset ovat usein samansuuntaisia sekä koko tutkimusjaksolle että toiselle sateiselle jaksolle, jolloin satoi suurin osa vuoden rankimmista sateista. Koska ristikorrelaatioiden mukaan ero kahden sateisen kauden viipymien välillä on selkeä, voi siitä tehdä johtopäätöksen, että sateen kokoluokalla on vaikutus sen viipymään. Suuret sateet nostavat jätevesivirtaamaa nopeammin kuin pienemmät. Tähän saattaa vaikuttaa esimerkiksi jo aiemmin todettu maan korkeampi vesipitoisuus suurien sateiden aikaan.

Keskimääräisen kuivan ajan jätevesivirtaaman vähentäminen mitatuista jätevesivirtaamista lyhentää viipymää joissakin tapauksissa tunnilla tai kahdella. Muutamassa tapauksessa se pidensi viipymää tunnilla. Vaikutus ristikorrelaatioon on joka tapauksessa pieni, joten voidaan olettaa, että keskiarvon vähentämisellä ei ole merkittävää vaikutusta tuloksiin.

Ristikorrelaatioiden perusteella pyrittiin päättelemään eri sateiden vaikutusten viipymät jätevesivirtaamaan. Ne ovat esitettyinä taulukossa 2. Oikeassa sarakkeessa on kuvattu ristikorrelaatiotulokset virtaamista, joista on vähennetty kuivan ajan keskiarvoinen virtaama eikä vasemman sarakkeen virtaamatietoja ole muokattu.

Viivytyksiä varten tulkittiin ristikorrelaatiokäyrien muotoa ja yhdisteltiin tuloksia sekä mitatuista arvoista että arvoista, joista on vähennetty keskiarvo. Viivytysten jälkeen satedietoja verrattiin lineaarisella korrelaatiolla jätevesivirtaamiin.

*Taulukko 2: Sadetiedoille valitut viivytykset*

<b>Osavaluma-alue</b>		
<b>Jätevesipumppaamo</b>	<b>26.4.2014-15.5.2014</b>	<b>Viivytys (h)</b>
<b>Ämmässuo</b>	Ämmässuo	4
<b>Kauklahti</b>	Ämmässuo	9
	Kauklahti	9
<b>Muulo</b>	Ämmässuo	12
	Kauklahti	13
	Muulo	13
<b>Saunalahti</b>	Ämmässuo	7
	Kauklahti	7
	Muulo	7
	Saunalahti	7
<b>4.8.2014-5.9.2014</b>		
<b>Ämmässuo</b>	Ämmässuo	4
<b>Kauklahti</b>	Ämmässuo	7
	Kauklahti	7
<b>Muulo</b>	Ämmässuo	9
	Kauklahti	7
	Muulo	7
<b>Saunalahti</b>	Ämmässuo	9
	Kauklahti	9
	Muulo	8
	Saunalahti	8

On kuitenkin muistettava, että ristikorrelaatio vertaa jokaisena tuntina mitattua sadetta, eikä erittele sadetapahtumia toisistaan. Usein sateet tapahtuvatkin melko tiiviisti peräkkäin, jolloin maa ei ole täysin kuiva. Varsinkin sateisten ajanjaksojen tuloksissa tämä näkyy niin, että todennäköinen viipymä erottuu terävämpänä huippuna ristikorrelaation käyrässä.

Ristikorrelaatiossa viiveet eivät välttämättä anna todellisia tuloksia, sillä jätevesivirtaamasta ei voida erottaa tietyn sateen aiheuttamaa osuutta. Kun valuma-alueilla sadetapahtumat ovat usein samanaikaisia, alemmilla pumppaamoilla on hankala erottaa, mikä osuus virtaamasta johtuu yläjuoksun sateesta ja mikä alajuoksun sateesta. Koska näillä sateilla

on erilaisia viipymiä suhteessa pumppaamon virtaamaan, ristikorrelaatioiden käyrät muuttuvat tasahuippuisemmiksi ja niistä on vaikeaa erottaa tiettyä viivettä. Huippua ta-soittavat myös erilaisten sateiden eripituiset viiveet. Näiden seurauksena viiveeksi vali-koituu jonkinlainen kompromissi eri viiveistä, joita dominoi eniten vuotava sade.

Jos kaikkia sateita kuitenkin viivytetään eniten korreloivan viiveen verran ja tutkitaan sitten sen korrelaatiota virtaamaan, pitäisi eniten vuotavan välin saada suurin korrelaatio-kerroin viiveelle. Näin voitaisiin erottaa väli, joka vuotaa eniten. Tämän jälkeisten osioi-den välistä vuotavuutta on kuitenkin hankala vertailla.

Vertailun helpottamiseksi voidaan etsiä pumppaamoiden väliset viiveet ja vähentää edel-lisen pumppaamon virtaama seuraavasta oikealla viiveellä. Tässä voi tulla virhettä pit-kistä viemäreistä, joissa virtaama tasaantuu. Tätä menetelmää ei sovellettu, sillä pump-paamoiden virtaamamittaukset eivät olleet keskenään vertailukelpoisia.

Joka tapauksessa Ämmässuolta Suomenojalle laskeva runkoviemäri on hankala tutkittava alue, sillä sen alkupäässä sadevesi pyritään johtamaan viemäriin. Ämmässuon suuret sa-devesimäärät hankaloittavat suurimman vuotoalueen etsintää.

### 5.3 Lineaarinen regressioanalyysi

Korrelaatiotestien lisäksi jätevesivirtaamia tarkasteltiin regressioanalyysillä. Regressio-analyysissä jätevesivirtaaman mitattu arvo pyritään selittämään ns. selittävillä muuttu-jilla, joita tässä tutkimuksessa olivat yläjuoksulla olevan pumppaamon virtaama, oman osavaluma-alueen sade, meriveden korkeus, tunti ja viikonpäivä. Analyysin tuloksena saadaan selittäjille kertoimet sekä jäännösvirhe, joka kertoo mallinnetun ja mitatun vir-taaman eron. Alla on esitetty lineaarisen regressiomallin kaava (4):

$$y_i = \alpha + \beta_1 * x_{i1} + \dots + \beta_p * x_{ip} + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

missä  $y$  on mitattu virtaama,  $\alpha$  on  $y$ -akselin leikkauspiste,  $\beta$  on selittäjä,  $x$  on selittäjän kerroin ja  $\epsilon$  on virhetermi.

Analyysin nollahypoteesi on, että selittäjällä ei ole vaikutusta selitettävään muuttujaan eli jätevesivirtaamaan. Jokaiselle selittäjälle lasketaan  $p$ -arvo, joka arvioi nollahypoteesin

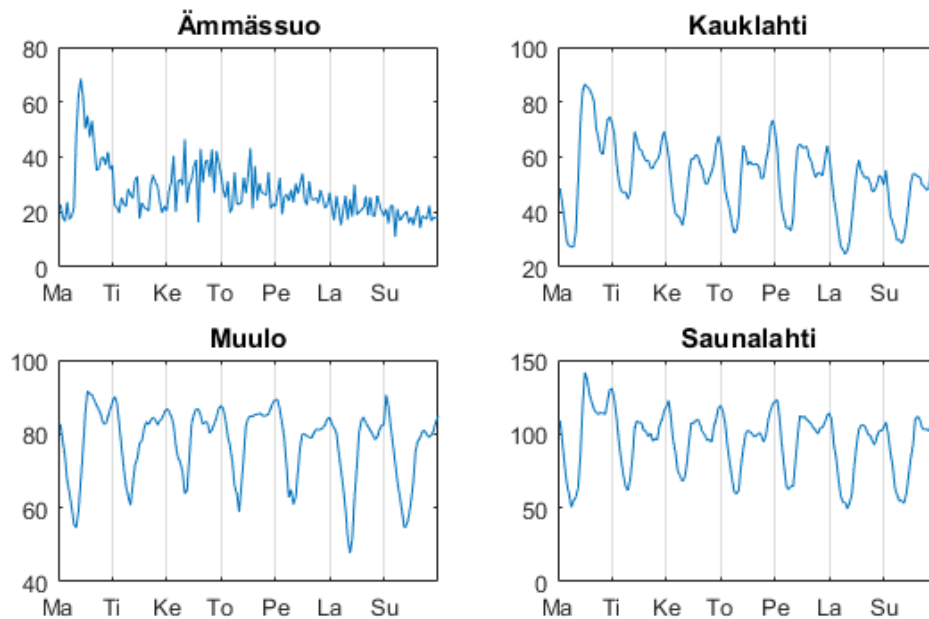
todennäköisyyttä. Jos p-arvo on alle 0,05, voidaan nollahypoteesia pitää kumottuna 95 prosentin todennäköisyydellä. Tällöin oletetaan, että selittäjä vaikuttaa selitettävään muuttujaan ja sen arvon muuttuminen johtaa selitettävän arvon muuttumiseen. Selittäjä, jonka p-arvo on alle 0,05, jätetään analyysin selittäjäksi ja sille arvioidaan kerroin. Selittäjän kerroin on arvio siitä, kuinka paljon selittäjä vaikuttaa selitettävään. Regressioanalyysissä jokaiselle selittäjälle lasketaan siis kaksi lukua: p-arvo, joka kertoo selittäjän todennäköisyyden vaikuttaa selitettävään sekä painokerroin, joka kertoo selittäjän vaikutuksen selitettävään arvoon.

Selittäjien lisäksi analyysin tuloksena on vakiokerroin, joka on kaikille ajanhetkille sama. Tämä vakiokerroin on se arvo, joka jää keskimäärin jäljelle kun selitettävästä vähennetään selittäjät kertoimineen. Se on siis keskimääräinen y-akselin leikkauspiste.

Aluksi jokaisen pumppaamon selittäviksi tekijöiksi valittiin edellisen pumppaamon virtaama, oman osavaluma-alueen sade ja merenpinnan korkeus. Aiempien pumppaamoiden osavaluma-alueilla viemäriin sisään vuotavan veden vaikutus on huomioitu jo ylävirran pumppaamon virtaamassa. Näin analyysissä saadaan eriteltyä eri alueilla tapahtuvien sateiden vaikutus jätevesivirtaamaan.

Virtaaman, sateen ja merenpinnankorkeuden lisäksi selittäjinä käytettiin kaikille jätevesivirtaamille viikonpäivää ja tuntia, sillä jätevesivirtaama riippuu yleensä vahvasti ajankohdasta. Kaikilla jätevesipumppaamoilla on selkeä kuivan kauden virtaamakäyrä, joka vaihtelee tunnin ja viikonpäivän mukaan, kun kotitaloudet ja muut vedenkuluttajat seuraavat tiettyä vedenkulutusrytmiä (kuva 23). Vedenkulutus on arkisin yleensä suurempaa kuin viikonloppuisin. Vuorokauden aikana kulutuksessa on kaksi huippua, aamuisin sekä iltaisin.





Kuva 23: Osavaluma-alueiden kuivan ajan keskiarvoiset käyrät

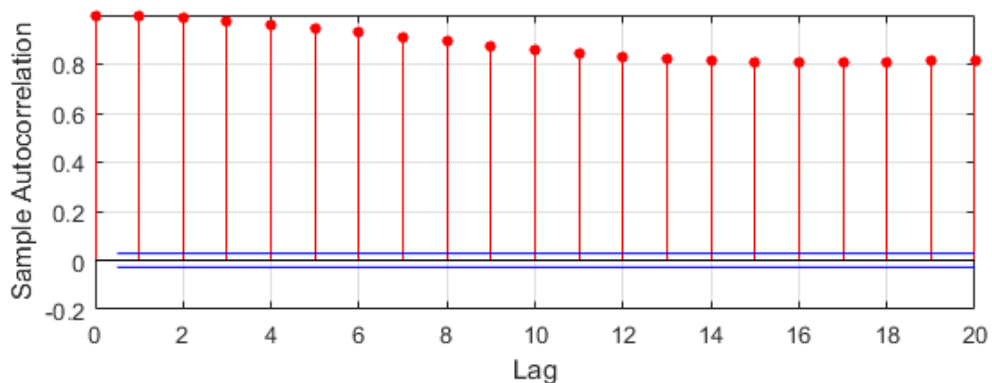
Jotta tuntien ja viikonpäivien vaikutus voitiin ottaa huomioon analyysissä, ne lisättiin malliin selittäjiksi dummy-muuttujina. Dummy-muuttujien käyttäminen mahdollistaa virtaamakertoimen laskemisen erikseen jokaiselle tunnille ja viikonpäivälle, jolloin mallissa tulee huomioitua vedenkulutuksen tunti- ja viikonpäivävaihtelu. Koska regressioanalyysissä tällaisten kategoristen muuttujien, kuten tunnin tai viikonpäivän, kerroin lasketaan suhteessa johonkin referenssitason, on jokin ajanhetki laskettava referenssitasoksi. Tässä tutkimuksessa viikonpäivien referenssitasoksi valittiin maanantai ja kellonajan referenssitasoksi 0. Dummy-muuttujien logiikasta on kerrottu laajemmin liitteessä 1.

Regressioanalyysit tehtiin ajalle 19.4.2014–31.10.2014 ja saatujen tulosten perusteella jätevesipumppaamoiden virtaamat ennustettiin ajalle 11.4.2014–18.4.2014, jolloin valuma-alueilla oli melko keskimääräisiä sateita. Vertaamalla ennustettua virtaamaa mitattuun virtaamaan keskimääräisillä sateilla voidaan arvioida muodostetun regressiomallin luotettavuutta.

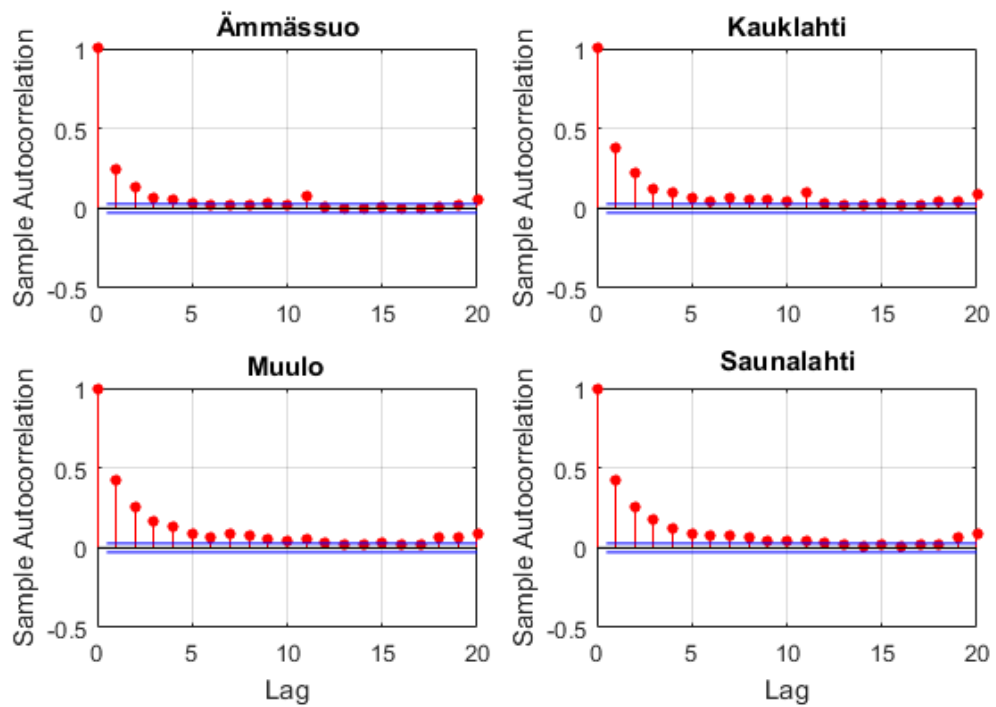
Regressioanalyysissä muodostettiin niistä selittäjistä, jotka eivät olleet dummy-muuttujia viiveet vähintään 24 edelliselle tunnille, jotta saataisiin näkyviin viiveellä vaikuttavat tekijät. Esimerkiksi yläjuoksun jätevesipumppaamon virtaama saattaa saapua seuraavalle

pumppaamolle vasta tuntien päästä ja sateelta voi kestää eripituisia aikoja päätyä viemäriin. Samoin merenpinnan nousu voi näkyä pumppaamolla vasta tuntien päästä. Yläjuoksulla olevan pumppaamon virtaamalle ja merenpinnan tasolle muodostettiin viiveet 36 tunnille, kun taas sateelle viiveitä oli 24.

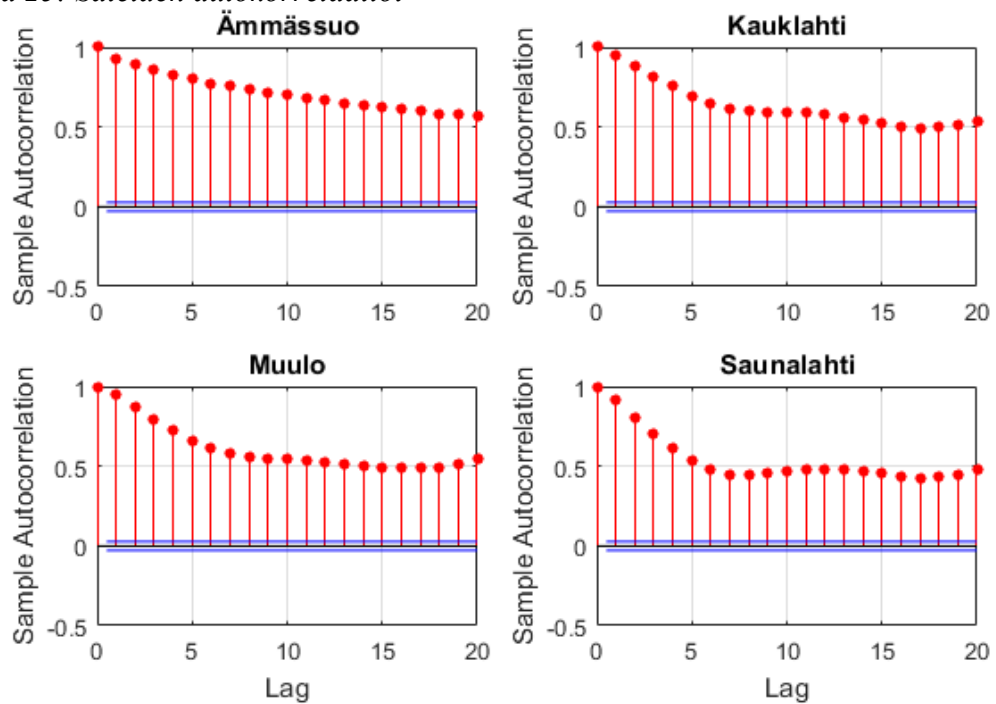
Sateet, virtaamat ja meriveden korkeus ovat autokorreloituneita (kuvat 24, 25 ja 26). Tämä tarkoittaa, että mitattu arvo korreloi saman muuttujan edeltävien arvojen kanssa eli se on niistä riippuvainen. Kuvaajissa edelliset tunnit on kuvattuina x-akselilla ja korrelaatiokertoimet y-akselilla. Siniset viivat rajaavat 95 % luottamusväliä. Yleensä korrelaatio on suurin edellisen tunnin kanssa. Esimerkiksi sademäärä on usein korreloitunut edellisen tunnin kanssa. Jos edellisen tunnin aikana on satanut, sataa todennäköisesti myös seuraavan tunnin aikana suunnilleen saman verran. Erityisesti meriveden korkeus on kuvan 24 mukaan vahvasti autokorreloitunut. Autokorrelaatio sekoittaa lineaarista regressioanalyysiä, jossa selittäjät eivät saisi lähtöoletuksen mukaan olla autokorreloituneita. Tästä syystä selittäjien autokorrelaatiosta täytyy mallia muodostettaessa pyrkiä eroon. Menetelmässä tehdään myös oletus selittäjien normaalijakautuneisuudesta, mitä ne eivät täytä. Näiden syiden takia voisi olla hyödyllistä kehittää menetelmää epälineaariseen suuntaan.



*Kuva 24: Meriveden autokorrelaatio*



Kuva 25: Sateiden autokorrelaatiot



Kuva 26: Virtaamien autokorrelaatiot

Lineaarisen regressiomallin viiveistä poistettiin selittäjien joukosta ensimmäiseksi ne, joilla oli suurimmat yli 0,05 arvoiset p-arvot. Kun joukosta oli poistettu selkeimpiä turhia viiveitä, kokeiltiin lisätä viiveitä, jotka sijaitsivat todennäköisimpien viiveiden lähellä ja tutkittiin lisäyksen vaikutusta. Näin yritettiin minimoida liiallista selittäjien karsintaa. Tätä jatkettiin, kunnes jäljellä oli vain selittäjiä, joiden p-arvo oli alle 0,05. Jättämällä

selittäjiksi kaikki viiveet, jotka p-arvon perusteella vaikuttavat virtaamaan, saadaan selitysasteesta mahdollisimman korkea.

Sen lisäksi, että regressioanalyysiin valittiin selittäjiä, jotka olivat tilastollisesti merkittäviä, niiden loogisuutta täytyi tarkastella. Esimerkiksi merenpinnan korkeus ei voi vaikuttaa negatiivisesti virtaamamääriin. Tämän takia oli poistettava kaikki selittäjät, joissa merenpinnan taso sai negatiivisen kertoimen, vaikka p-arvo olisi ollut riittävän pieni. Samoin sade ei voi vähentää jätevesivirtaamaa, joten myös sen negatiiviset vaikutukset poistettiin.

Autokorreloivan arvon lisääminen tai poistaminen mallista vaikuttaa toisen selittäjän p-arvoon ja kertoimeen jolloin selittäjien valinta vaikeutuu. Myös eri lajin selittäjien välinen korrelaatio hankaloittaa regressio-analyysiä. Vaikka lineaarisen regressiomallin selittäjien valinta oli hankalaa autokorrelaation takia, oli kaikkien pumppaamoiden malleista melko helppo huomata, että tietyt muuttujat jäivät kaikilla kokeilla selittäjäyhdistelmällä mallin selittäjiksi. Varsinkin paljon vuotavesiä sisältävillä pumppaamoilla tämä oli yleistä.

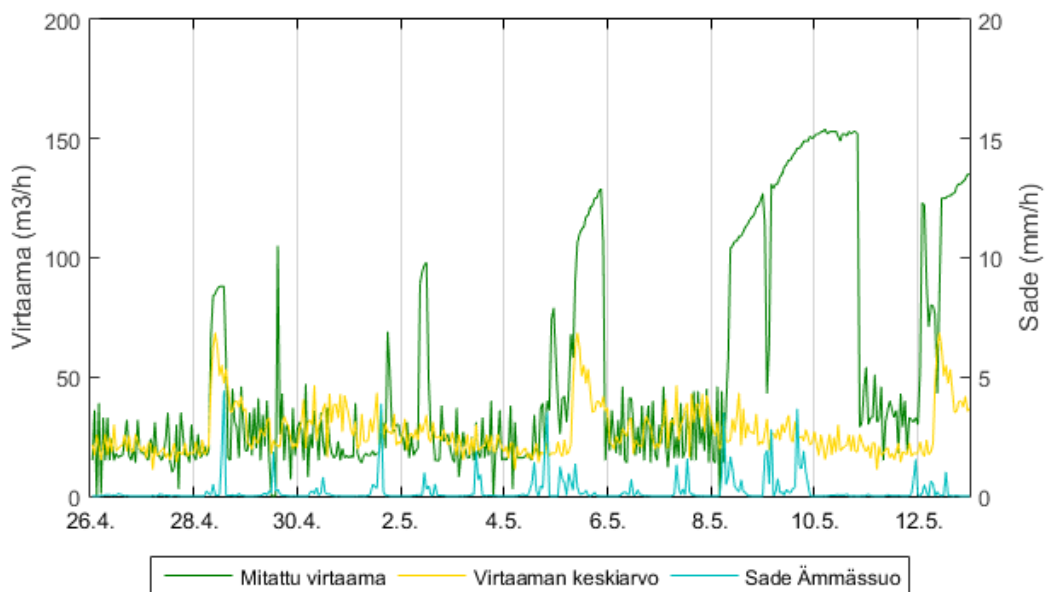
## 6 Tulokset

Jätevesivirtaamille ja sateille muodostettiin korrelaatiokertoimet ja arvioitiin sateiden vaikutusta jätevesivirtaamaan lineaarisella regressioanalyysillä. Lopuksi tarkasteltiin näiden tulosten oikeellisuutta.

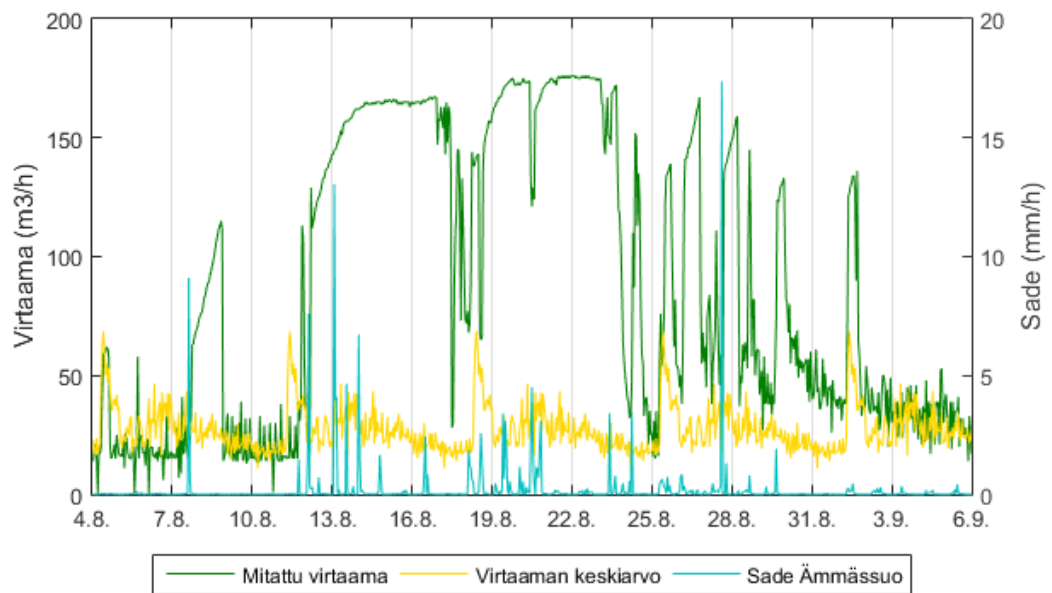
### 6.1 Jätevesivirtaamat ja sadannat

Vertaamalla visuaalisesti jätevesivirtaamia ja sadetietoja on mahdollista tehdä yleisiä päätelmiä alueen vuotavuudesta. Tätä käytettiin tutkittujen menetelmien tulosten oikeellisuuden arviointiin.

Kuvien 27 ja 28 mukaan Ämmässuon jätevesipumppaamon JVP2113 virtaama kasvaa huomattavasti sateiden aikana keskimääräisestä kuivan ajan jätevesivirtaamasta. Vuoden suurimpien sateiden aikana virtaama nousee yli sadalla kuutiolla tunnissa. Vaikka virtaaman arvojen ei voi luottaa olevan täysin oikeita, voi kasvua virtaamaan silti olla yli 300 prosenttia. Suurin sade sateisen tutkimusjakson aikana oli 17 mm/h. Koska tämä oli kuitenkin vain lyhytkestoinen sade, se ei aiheuttanut suurimpia virtaamia jätevesipumppaamolla.



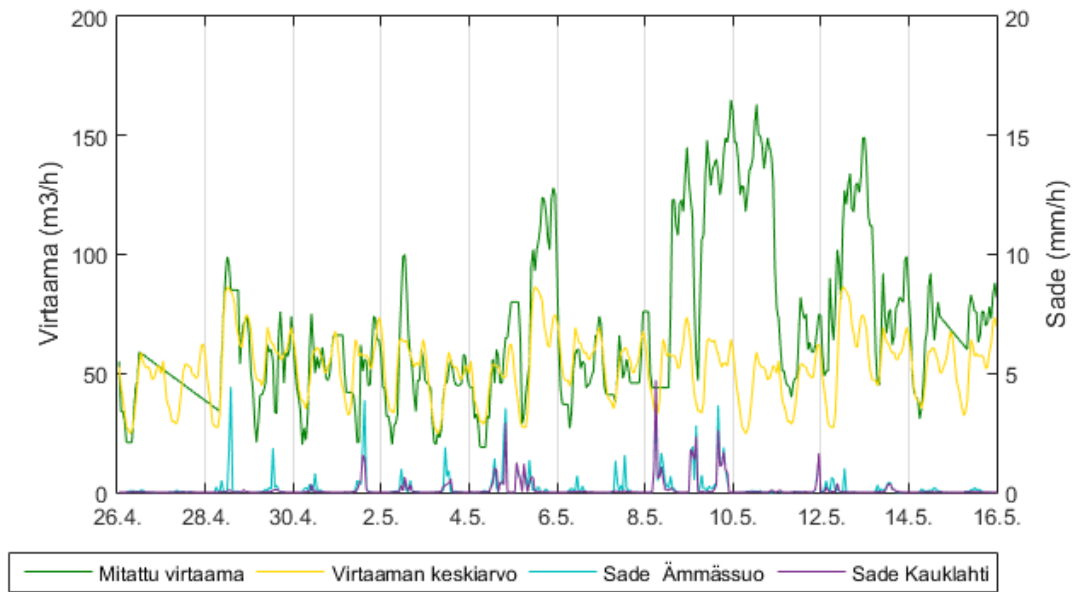
Kuva 27: Ämmässuo 26.4.2014–15.5.2014



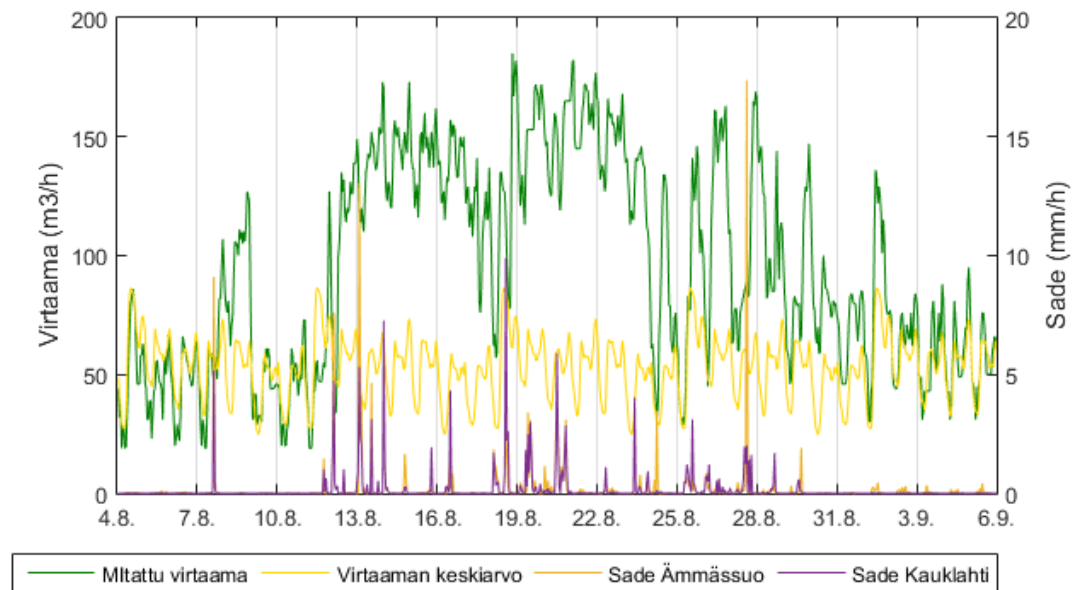
*Kuva 28: Ämmässuo 4.8.2014–5.9.2014*

Suurimmillaan pumpattu jätevesimäärä on keskimäärin maanantaisin kun taas viikonloppuisin jäteveden määrä on pienempi. Tämä johtuu siitä, että viikonloppuisin alueella sade- ja hulevedet ohjataan varastoaltaisiin ja viikonlopun jälkeen ne pumpataan jätevesiviemäriin. Näin pyritään estämään tilanne, jossa yllättävän rankkasateen sattuessa sade- ja hulevedet johdettaisiin päätasausaltaaseen, joka saattaisi vuotaa yli.

Ämmässuon jätevesipumppaamon jälkeen Kauklahden ensimmäisen sateisen jakson (kuva 29) perusteella sateiden alueellisissa määrissä ei ole merkittäviä eroja, mutta toisella sateisella jaksolla (kuva 30) niitä voidaan jo erottaa. 18.8.2014 Kauklahdessa sataa paljon samaan aikaan kun Ämmässuon sateet jäivät alle 2,6 mm/h. Kauklahden suurin sade sen sijaan on lähes 10 mm/h. Kauklahden sateiden seurauksena jätevesivirtaama pumppaamolla nousee huippuunsa noin viiden tunnin kuluttua suurimmasta tuntisateesta.



Kuva 29: Kauklahti 26.4.2014–15.5.2014



Kuva 30: Kauklahti 4.8.2014–5.9.2014

Kaukalahden valuma-alueella kahdella sateisella ajanjaksolla mitattu virtaama nousee keskiarvovirtaamasta, eli noin 70 kuutiometristä tunnissa, toisen sateisen kauden maksimiin 185 kuutiometrin tunnissa. Taaskaan mitattuihin virtaamiin ei voida täysin luottaa. Korkeimman virtaaman aikaan suurin tunneittainen sademäärä on lähes 10 mm ja suurimmasta sadepiikistä huippuvirtaamaan on kuusi tuntia. Tämä viipymä on yhtenevä

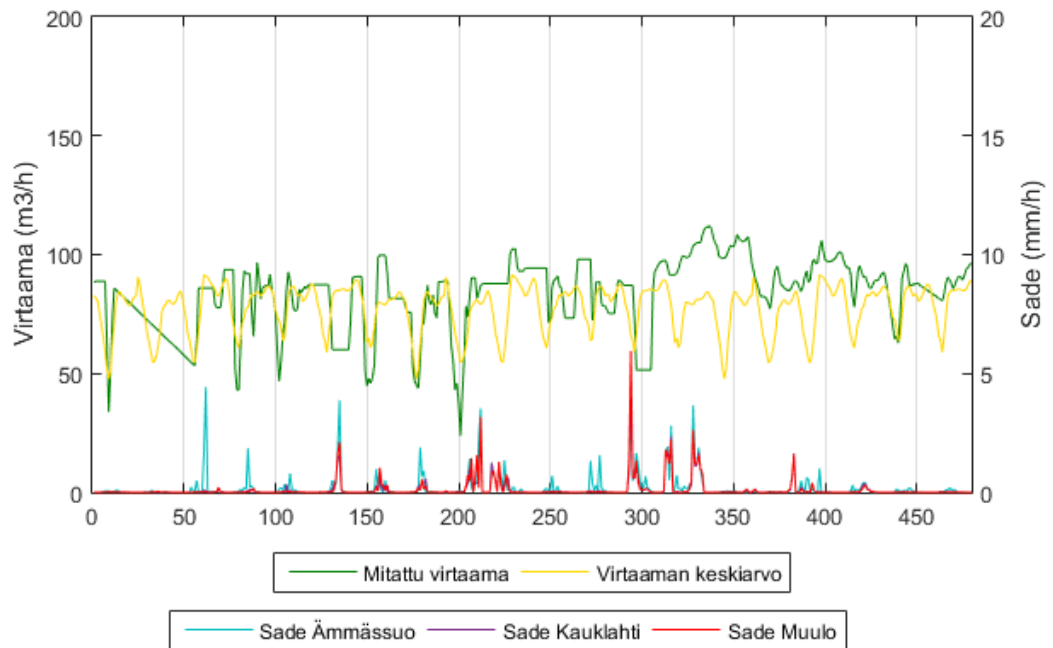
jälkimmäiselle sateiselle ajanjaksolle sekä koko tutkimusjaksolle tehtyjen ristikorrelaatioiden kanssa.

16.8. Kauklahdessa satoi korkeimmillaan 4,3 mm/h, kun taas Ämmäsuolla sade jäi alle 2,5 mm/h. Näillä sateilla ei kuitenkaan ollut vaikutusta jätevesipumppaamon virtaamaan. 25.8.2014 esiintyi pieniä, mutta pitkäkestoisia sateita sekä Kauklahden että Ämmäsuon valuma-alueilla, joskin Kauklahden sateet olivat hieman suurempia. Suurin sade oli kuitenkin vain 3,1 mm/h Kauklahden alueella. Näin pienillä sateilla Kauklahden virtaama lähti kuitenkin nousuun. Luultavasti maa oli tiheiden sateiden takia valmiiksi märkää ja vesi päätyi helpommin jätevesiverkostoon. Jos sateet siis tapahtuvat tiiviisti, ei yksittäisen tunnin sateen tarvitse olla kovin suuri, jotta virtaama kohoaisi. Tämä viittaa siihen, että vettä päätyy jätevesiverkostoon suodautumalla.

Erityisesti Ämmäsuon sateet kasvattavat jätevesivirtaamaa pumppaamolla, mikä on loogista, sillä sieltä kaikki sadevedet johdetaan viemäriin. Vaikuttaakin siltä, että noin 5 mm/h sateet Kauklahden alueella eivät kasvata jätevesivirtaamaa, jos samaan aikaan Ämmäsuolla sataa vain hieman. Vasta noin 10 mm/h sateet Kauklahden alueella saavat virtaaman nousuun. Tämän perusteella vuoden suuret sateet saavat jätevesivirtaaman kasvamaan, mutta kokonaisuudessa Kauklahden vuotovesimäärät ovat maltillisia.

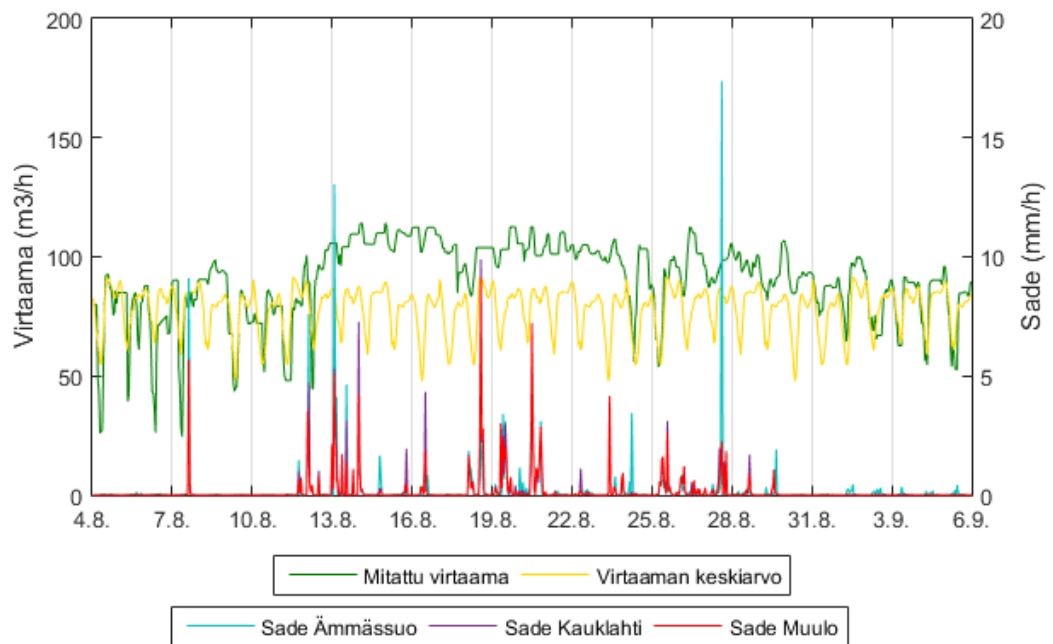
Muulon ensimmäisen sateisen ajanjakson (kuva 31) perusteella viemärivälin jätevesimäärä nousee tavanomaisesta keskimääräisillä sateilla, kun sadetapahtumat ovat toistuvia. Tällöin maaperä on valmiiksi märkä ja vesi kulkee sen läpi nopeammin jätevesiviemäriin. Jätevesivirtaaman kasvu on kuitenkin melko pientä ja sitä tapahtuu yleensä vain kun myös Ämmäsuolla sataa. Tämän takia ensimmäisen sateisen ajanjakson perusteella on hankala määritellä varmasti vuotaako Kauklahti-Muulo välillä vuoto- ja hulevettä jätevesiverkostoon. Jos vettä kuitenkin vuotaa, sen määrät pysyvät melko pieninä keskimääräisillä sateilla. Esimerkiksi 8.5.2014–10.5.2014 sataa paljon ja tiheästi, mutta Muulon virtaamat eivät nouse merkittävästi keskimääräisestä virtaamasta.





Kuva 31: Muulo 26.4.2014–15.5.2014

Muulon toisen sateisen kauden (kuva 32) perusteella virtaama ei nouse kovinkaan paljoa sateiden myötä. Kuitenkin juuri Muulon tämän jakson virtaamaan on suhtauduttava epäilyksellä, sillä sen mitattujen arvojen on todettu olevan virheellisiä ja skaalauksen jälkeen sen virtaama on pienempää kuin yläjuoksun pumppaamon virtaama. Pumppaamolla on ollut virheellinen tuottoarvio, jonka virhe ei näytä olevan täysin tasainen, vaan se mahdollisesti vaihtelee mitatun virtaaman suuruuden mukaan.

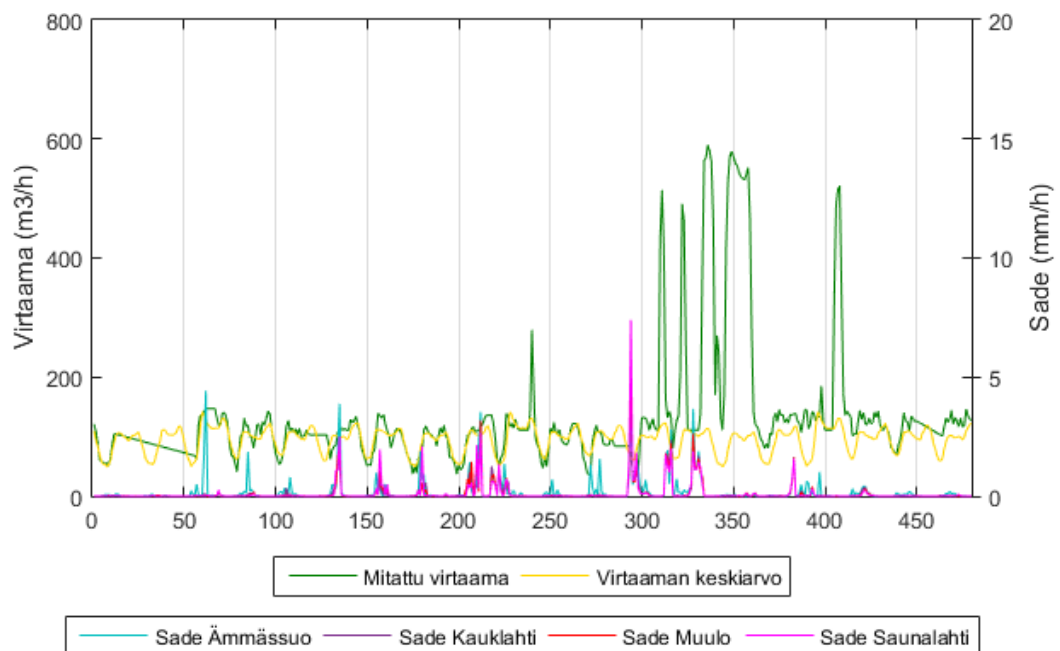


Kuva 32: Muulo 4.8.2014–5.9.2014

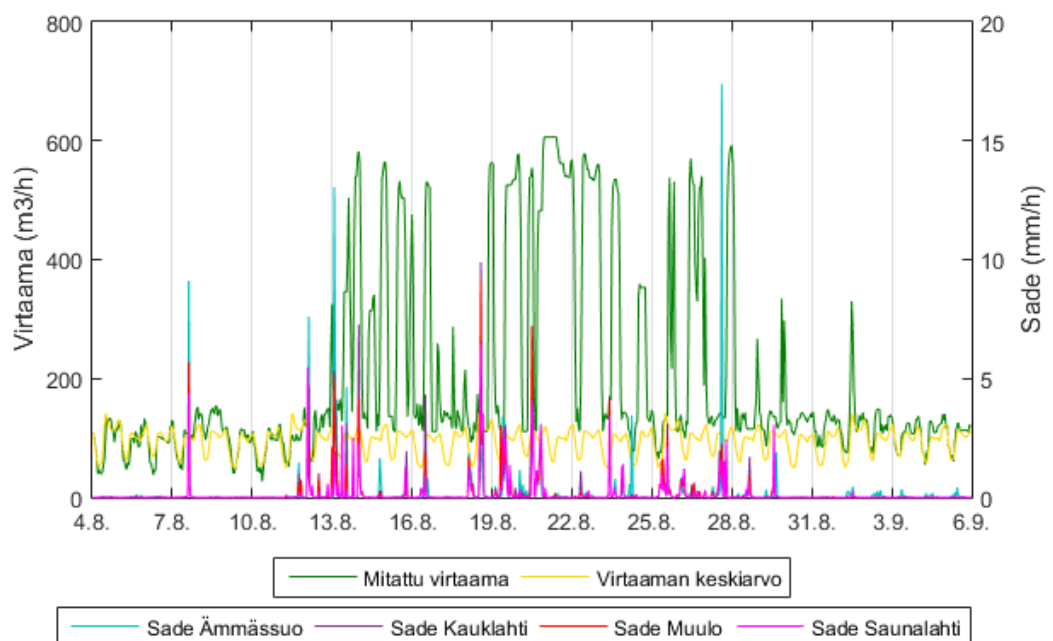
Aiemman tulkinnan mukaan Kaukalahden sateiden ei pitäisi vaikuttaa kovinkaan paljoa Muulon virtaamaan, sillä alueen ei pitäisi olla herkästi vuotava. Ämmässuon sadevedet sitä vastoin kulkevat Muulon kautta ja kuvaajista täytyy erottaa niiden vaikutus virtaamaan, jotta saadaan selvitettyä vuotaako väli Kauklahti-Muulo. Ämmässuon sateet saattavat myös ehtiä tasoittua jätevesiviemäriin. Ämmässuon sateet saavat Muulon virtaaman nousemaan, mutta esimerkiksi 23.8. kun Ämmässuolla sataa 3,4 mm/h ja Muulossa sataa 4,5 mm/h, virtaama lähtee laskuun. Tästä voidaan vetää johtopäätös, että Muulon sateet eivät vuoda jätevesiverkostoon.

Yleensä Muulon jätevesivirtaama reagoi hitaasti sekä Ämmässuon että oman alueensa sateisiin ehkä osittain juuri Ämmässuon tasoittuneen virtaaman johdosta. 18.8.2014 ja 20.8.2014 Muulossa satoi selvästi runsaammin kuin Ämmässuolla, sillä Ämmässuon sateet olivat 18.8.2014 suurimmillaan hieman alle 2,6 mm/h ja 20.8.2014 4,5 mm/h. Muulossa satoi korkeimmillaan 18.8.2014 9,1 mm/h ja 20.8.2014 7,2 mm/h. 18.8.2014 sateet nostivat hieman jätevesivirtaamaa, mutta 20.8.2014 sateet eivät juuri vaikuttaneet virtaamamääriin. Muulon jätevesivirtaama reagoi melko vähän sateisiin. Jopa vuoden suurimpien sateiden aikaan virtaama kohoaa vain hieman, mutta melko pitkäaikaisesti. Tämä viittaisi siihen, että Ämmässuon vuoto- ja hulevesien vaikutus näkyy virtaamassa melko pitkään. Tulosten perusteella Muulon osavaluma-alueelta ei päädy vuoto- ja hulevettä suurissa määrin jätevesiverkostoon.

JVP2115 Saunalahden virtaama kasvaa huomattavasti sateiden seurauksena. Jätevesivirtaaman suhteellinen kasvu on korkeampi kuin muilla pumppaamoilla ja jo tästä voidaan päätellä pumppaamovälin vuotavan erityisen paljon (kuvat 33 ja 34). Ämmässuolta Suomenojalle johtavalla viemäriosuudella on todennäköistä, että vuodot keskittyvät erityisesti loppupäähän betonisille viemäripätkille, jotka ovat alttiita korroosiolle. Viemäriin kulkee paljon orgaanista ainesta sisältävää jätevettä kaatopaikalta, joka kuluttaa hapen viemäristä. Hapen loppuessa ilmenee korroosio-ongelmia, jotka lisäävät viemärivuotojen riskiä. (Yang et al. 2004.) Runkoviemäriin alkupäässä happea on yleensä jäljellä, mutta Saunalahteen mennessä se on ilmeisesti kulunut loppuun. Saunalahden jätevesipumppaamolla suodatetaankin poistoilma aktiivihiilisuodattimella hajuhaittojen takia ja pumppaamovälillä on tapahtunut korroosiosta johtuva romahdus.



Kuva 33: Saunalahti 26.4.2014–15.5.2014



Kuva 34: Saunalahti 4.8.2014–5.9.2014

Saunalahdessa ei jälleen tarvinnut ottaa aiempien Kauklahden ja Muulon osavalmu-alueiden sateita huomioon, sillä niistä ei päädy merkittävästi vuoto- ja hulevettä jätevesipumppaamoille. Saunalahden jätevesipumppaamon virtaama kasvaa erityisesti silloin,

kun sateet ovat pitkäaikaisia. Pitkillä sateilla yksittäisen sademäärän ei tarvitse olla kovinkaan iso, jotta se saa virtaaman nousemaan. Näin kävi esimerkiksi 25.8.2014 ja 26.8.2014, jolloin Saunalahdessa satoi enimmillään 2,2 mm/h. Koska sateet olivat kuitenkin pitkäkestoisia, kohosi virtaama yli 500 kuutioon tunnissa.

Saunalahden vuotovesiin voi vaikuttaa merenpinnan korkeus, sillä Muulon ja Saunalahden jätevesipumppaamoiden välinen linja kulkee lähellä rantaa. Myös itse pumppaamo sijaitsee rannassa. Merivesi voi siis päästä suoraan sisään jätevesiverkostoon esimerkiksi avonaisen kaivonkannen tai ylivuotorakenteiden kautta. Jos ylivuotorakenteessa ei ole luukkua tai se on epäkunnossa, sen kautta saattaa päästä merivettä suoraan jätevesipumppaamolle. Saunalahden pumppaamon tulviessa jätevesi palautuu sitä edeltäneeseen kaivoon, josta se johdetaan mereen. Pumppaamo ei siis ole ylivuotorakenteen kautta yhteydessä hulevesiverkostoon, mutta ylivuotorakenteen kautta saattaa päätyä merivettä jätevesiverkostoon. Ensimmäiseksi kannattaisi tarkistaa tämän välin rannassa sijaitsevat kaivot sekä ylivuotorakenteet.

On myös mahdollista, että Saunalahden jätevesipumppaamon virtaamamittauksessa on vikaa. Mittaukset saattavat kasvaa suhteettoman paljon, kun tietty virtaamaraja ylitetään. Tällöin mittaus liioittelisi vuotovesien määrää. Tähän seikkaan viittaa huippuvirtaamista puuttuva vuorokautinen vaihtelu virtaamissa. Joka tapauksessa virtaamamittarin toiminta kannattaa tarkistaa esimerkiksi asentamalla pumppaamolle rinnakkainen mittari. Analyysien toimivuuteen tällä ei kuitenkaan pitäisi olla erityisen paljoa vaikutusta, sillä niiden pitäisi kyetä mallintamaan mahdolliset sateesta johtuvat säännölliset virhearvot vuotovesiksi.

Saunalahden pumppaamon jälkeen runkoviemäriin yhdistyy Kirkkonummelta tuleva viemäri. Jos liittyvä jätevesi on happipitoista, voivat korroosio-ongelmat vähentyä Saunalahden jätevesipumppaamon jälkeen. Toisaalta liittyvä runkoviemäri on pitkä ja sen happi on voinut kulua loppuun liitokseen mennessä. Tässä tapauksessa runkoviemäriässä on luultavasti vuoto-ongelmia betonisilla osuuksilla myös lähempänä Suomenojan jätevedenpuhdistamo.

## 6.2 Korrelaatiokertoimet

Ristikorrelaatioiden perusteella pääteltiin mahdollisia viipymiä jätevesiverkostoon pääseville vuoto- ja hulevesille. Näiden tulosten pohjalta osavaluma-alueiden sadetietoja viivytettiin, minkä jälkeen niitä verrattiin korrelaatiotestillä jätevesivirtaamiin. Sadedataa verrattiin myös jätevesivirtaamiin, joista oli vähennetty keskiarvoinen kuivan ajan virtaama. Näin pyrittiin vähentämään vuorokausivaihtelun vaikutusta analyyseissä. Alla olevassa taulukossa 3 on esitetty virtaamien ja niiden omien sateiden korrelaatiotestien tulokset.

*Taulukko 3: Korrelaatiokertoimet sateille ja mitatuille virtaamille tai virtaamille, joista on vähennetty kuivan ajan virtaama*

	Mitatuilla virtaamilla	Ilman keskiarvoa
Jätevesipumppaamo	26.4.2014–15.5.2014	
Ämmässuo	0,1998	0,1913
Kauklahti	0,2663	0,2673
Muulo	0,1421	0,1424
Saunalahti	0,2454	0,2437
	4.8.2014–5.9.2014	
Ämmässuo	0,1998	0,1998
Kauklahti	0,2621	0,2636
Muulo	0,1428	0,1273
Saunalahti	0,2465	0,2443

Saadut korrelaatiokertoimet ovat osittain ristiriidassa aiempien virtaama- ja sadekuvaajista tehtyjen johtopäätösten kanssa. Niiden perusteella korkeimman korrelaatiokertoimen saa Kauklahden osavaluma-alue kaikilla sadejaksoilla ja laskutavoilla. Kauklahden perässä tulee Saunalahti, josta on mitattu sateen seurauksena selkeästi suurimpia jätevesivirtaamia. Näiden jälkeen vuotavimmaksi on arvioitu Ämmässuo, jossa sadevedet ohjataan jätevesiverkostoon. Ämmässuon korrelaatiokerrointa todennäköisesti laskee vesien pumppausohjelma, joka tasoittaa ja viivästyttää virtaamapiikkejä. Vesiä säilytetään altaissa, joista ne pumpataan mahdollisimman tasaisesti viemäriin. Tämä takia sateella ja virtaamalla ei ole yhtä selkeää ajallista yhteyttä. Muulon sade jää virtaaman kanssa vähiten korreloivaksi, mikä noudattaa aiemmin tehtyjä johtopäätöksiä sen vähäisestä vuotavuudesta.

Kuivan ajan keskiarvovirtaaman vähentämisellä oli vain pieni vaikutus kertoimiin. Yhdessä tapauksessa kerroin säilyi ennallaan. Erot kertoimien välillä jäivät pääasiassa pieniksi. Suurin ero oli noin 11 %. Myös sateisten kausien väliset erot korrelaatiokertoimissa olivat pienet.

Saatujen tulosten perusteella korrelaatiotesteillä ei saatu selvitettyä eniten vuotavaa aluetta, vaikka tässä tapauksessa vaikutus jätevesivirtaamaan on selvästi keskittynyt tietylle alueelle. Epäluotettavat tulokset voivat johtua esimerkiksi ristikorrelaatiovaiheesta. Toisiaan lähellä sijaitsevilla osavaluma-alueilla sateet ovat usein samanaikaisia ja niiden vaikutusta jätevesivirtaamaan on vaikea erottaa toisistaan. Ristikorrelaatiolla ja korrelaatiolla ei myöskään voida arvioida yläjuoksun pumppaamoiden osuutta jätevesivirtaamasta. Nämä aiheuttavat virheitä oman osavaluma-alueen sateen osuuden arviointiin. Jos pumppaamoilta saatavat virtaamatiedot olisivat laadullisesti luotettavampia, voitaisiin yläjuoksun pumppaamon virtaama erottaa alajuoksun virtaamasta ja verrata jäljelle jäävää osuutta sateisiin.

Korrelaatiotestillä saadaan myös tulos vain tietyn sadeviiveen ja jätevesivirtaamaan riippuvuudesta. Koska sateilla on erilaisia viipymiä suhteessa pumppaamon virtaamaan, ristikorrelaatioiden käyrät muuttuvat tasahuippuisemmiksi ja niistä on vaikeaa erottaa tiettyä viivettä. Huippua tasoittavat myös erilaisten sateiden eripituiset viiveet. Näiden seurauksena viiveeksi valikoituu jonkinlainen kompromissi eri viiveistä, joita dominoi eniten vuotovesiä aiheuttava sade. Yhden piikin korkeuden selvittämistä kokonaisuuden kannalta tärkeämpää voisi olla selvitys ristikorrelaatiokuvaajan pinta-alasta. Tällöin saataisiin kumulatiivinen arvio eri viiveiden vaikutuksista.

Tässä menetelmässä ei voida ottaa myöskään huomioon meriveden vaikutusta jätevesivirtaamaan, sillä korrelaatiotestit tehtiin vain kahden muuttujan välillä. Jos merivedellä on suuri vaikutus vuoto- ja hulevesiin, se jää tarkastelematta tässä analyysitavassa. Menetelmässä ei oteta meriveden lisäksi huomioon myöskään pohjaveden vaikutusta, mutta sillä tuskin on vaikutusta tuloksiin, sillä virtaama- ja sadekuvaajista päätellen sateella on suurin vaikutus jätevesivirtaaman nousuun.

Näiden tulosten perusteella tämä menetelmä ei siis sovellu vuoto- ja hulevesien data-analyysiin.

### 6.3 Lineaarinen regressioanalyysi

Kunkin pumppaamon virtaamalle muodostettiin regressiomalli. Mallien tulokset olivat samassa linjassa virtaama- ja sadekäyristä tehtyjen johtopäätösten kanssa.

Kauklahden regressioanalyysin perusteella sen oman osavaluma-alueen sadanta vaikuttaa 6, 8, 9, 19 ja 24 tunnin viiveellä kertoimella 5,5 pumppaamon jätevesivirtaamaan (taulukko 4). Sadekertoimet olivat suurimpia kuusi ja yhdeksän tuntia aiemmin mitatuille sateille eli sade ei vaikuttanut heti jätevesivirtaamaan. Tämä saattaa viitata suotautumisen ja maanpäällisten vikojen kautta vuotavien vesien yhteisvaikutuksiin. Jos jokaisena vaikuttavana tuntina olisi satanut 1 mm, se tarkoittaisi 5,5 m<sup>3</sup>/h lisäystä jätevesivirtaamaan. Keskiarvoinen virtaama kuivana aika Kauklahdessa on 52 m<sup>3</sup>/h. Kauklahden sadantaa siis päätyy jonkin verran jätevesiverkostoon.

#### Taulukko 4: Kaukalahden lineaarinen regressioanalyysi

Linear regression model:

Virtaama2059 ~ [Linear formula with 36 terms in 35 predictors]

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	38.024	0.43225	87.967	0
Virtaama2113LAG0	0.020393	0.0086613	2.3544	0.018593
Virtaama2113LAG1	0.18348	0.010512	17.455	4.4078e-66
Virtaama2113LAG2	0.28459	0.010636	26.756	1.5554e-146
Virtaama2113LAG3	0.14323	0.010509	13.629	1.7466e-41
Virtaama2113LAG4	0.031138	0.0087841	3.5448	0.00039687
Virtaama2113LAG18	0.017907	0.0064691	2.768	0.0056625
Virtaama2113LAG21	-0.019389	0.0082414	-2.3527	0.018682
Virtaama2113LAG23	0.025102	0.0070826	3.5441	0.0003979
Sade2059LAG6	1.6551	0.40097	4.1277	3.7303e-05
Sade2059LAG8	1.2463	0.4221	2.9526	0.0031668
Sade2059LAG9	1.6998	0.41742	4.072	4.7399e-05
Sade2059LAG19	0.88134	0.39477	2.2326	0.025626
MerivesiLAG24	0.0045751	0.0011279	4.0563	5.0702e-05
Tunti1	-8.4011	0.7558	-11.115	2.4489e-28
Tunti2	-15.545	0.75628	-20.555	7.8379e-90
Tunti3	-20.175	0.75753	-26.633	2.6868e-145
Tunti4	-22.578	0.75741	-29.809	1.9707e-178
Tunti5	-24.197	0.75715	-31.958	3.0025e-202
Tunti6	-23.691	0.7585	-31.234	4.2114e-194
Tunti7	-20.084	0.7534	-26.658	1.5035e-145
Tunti8	-11.675	0.75235	-15.518	5.9121e-53
Tunti9	-2.761	0.75369	-3.6634	0.00025177
Tunti12	1.9385	0.75573	2.5651	0.010347
Tunti13	2.0174	0.75405	2.6754	0.0074905
Tunti14	1.8792	0.75136	2.5011	0.012416
Tunti16	-2.0893	0.75244	-2.7767	0.0055139
Tunti17	-2.7705	0.75371	-3.6758	0.00023989
Tunti18	-2.2383	0.75358	-2.9701	0.0029922
Tunti20	2.5996	0.75412	3.4472	0.00057168
Tunti21	7.6192	0.75455	10.098	1.0074e-23
Tunti22	10.961	0.75485	14.521	9.8565e-47
Tunti23	7.2632	0.75469	9.6241	1.0197e-21
Torstai	0.96487	0.41343	2.3338	0.01965
Lauantai	-3.0405	0.41699	-7.2915	3.5993e-13
Sunnuntai	-3.0128	0.43419	-6.9389	4.5125e-12

Number of observations: 4560, Error degrees of freedom: 4524

Root Mean Squared Error: 9.47

R-squared: 0.927, Adjusted R-Squared 0.927

F-statistic vs. constant model: 1.64e+03, p-value = 0

Muulon regressioanalyysissä (taulukko 5) kaikki sadeviiveet saivat liian suuren p-arvon eli niillä ei ollut tilastollista vaikutusta jätevesivirtaamaan. Alueelta ei siis vuoda sadevettä sisään jätevesiverkostoon. Tämä on positiivinen tulos mallille, sillä sen perusteella regressioanalyysillä voidaan erotella eri alueiden vuotavuus myös niissä tapauksissa, joissa yläjuoksun osavaluma-alueella on vuotoja, mutta alajuoksulla ei. Joissain muissa malleissa juuri tämä voi olla ongelmana, sillä edellisen alueen vuoto- ja hulevedet voi olla vaikea erottaa oman alueen vastaavista virtaamista.



## Taulukko 5: Muulon lineaarinen regressioanalyysi

Linear regression model:

Virtaama2060 ~ [Linear formula with 20 terms in 19 predictors]

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	58.621	0.70863	82.725	0
Virtaama2059LAG0	0.047472	0.020589	2.3057	0.021176
Virtaama2059LAG1	0.13733	0.031572	4.3497	1.395e-05
Virtaama2059LAG2	0.11776	0.021376	5.509	3.822e-08
Virtaama2059LAG12	0.04069	0.0090882	4.4772	7.7601e-06
Virtaama2059LAG24	0.028776	0.0091638	3.1402	0.0017
Virtaama2059LAG34	0.042342	0.0081734	5.1804	2.3163e-07
MerivesiLAG9	0.0032371	0.0016174	2.0015	0.045405
Tunti3	-3.2039	1.0197	-3.1421	0.0016891
Tunti4	-6.1527	1.0237	-6.0102	2.0079e-09
Tunti5	-9.2854	1.0374	-8.9503	5.1934e-19
Tunti6	-11.58	1.0442	-11.09	3.3919e-28
Tunti7	-15.105	1.0566	-14.296	2.5613e-45
Tunti8	-15.5	1.0604	-14.618	2.9634e-47
Tunti9	-12.145	1.0635	-11.42	8.9791e-30
Tunti10	-8.5188	1.0382	-8.2056	3.0105e-16
Tunti11	-5.5455	1.0036	-5.5256	3.4806e-08
Tunti12	-2.7999	0.99599	-2.8112	0.0049586
Perjantai	-2.0442	0.55264	-3.699	0.00021915
Sunnuntai	-1.6573	0.57156	-2.8997	0.0037546

Number of observations: 4275, Error degrees of freedom: 4255

Root Mean Squared Error: 12.5

R-squared: 0.594, Adjusted R-Squared 0.592

F-statistic vs. constant model: 328, p-value = 0

Saunalahden jätevesipumppaamon oman osavaluma-alueen sadevesi korreloi jätevesivirtaaman kanssa viipymillä 5-12, 14, 17, 18 ja 20-24 tuntia ja kertoimet olivat suurimmillaan, kun mitatusta tuntisateesta oli kulunut 7 tai 24 tuntia (taulukko 6). Sade vaikuttaa siis varsin pitkällä aikavälillä jätevesivirtaamaan, mikä viittaa siihen, että alueella osa vedestä virtaa nopeasti viemäriin, kun taas osa suotautuu keskinopeasti ja sateen jälkeen vielä varsin pitkään sadevedet vaikuttavat jätevesivirtaamaan. Sateiden yhteen laskettu kerroin on 235,7 eli sadevetä päätyy tällä alueella runsaasti sisään jätevesiverkostoon. Yhden millin sataessa jokaisena tuntina lisäys jätevesivirtaamaan on mallin mukaan 235,7 m<sup>3</sup>/h. Kuivan ajan keskiarvoinen jätevesivirtaamavirtaama on Saunalahdessa 95 m<sup>3</sup>/h. Saunalahti on tutkituista pumppaamoalueista selkeästi eniten vuotava alue.

## Taulukko 6: Saunalahden lineaarinen regressioanalyysi

Linear regression model:

Virtaama2115 ~ [Linear formula with 43 terms in 42 predictors]

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-15.35	7.6346	-2.0105	0.044434
Virtaama2060LAG0	0.67725	0.080585	8.4042	5.7113e-17
Virtaama2060LAG4	0.36535	0.076865	4.7531	2.0659e-06
Virtaama2060LAG16	0.39599	0.068435	5.7863	7.6817e-09
Virtaama2060LAG22	-0.15998	0.077034	-2.0768	0.037878
Virtaama2060LAG31	0.30948	0.07556	4.0958	4.2801e-05
Virtaama2060LAG35	0.27913	0.074748	3.7343	0.00019057
Sade2115LAG5	11.113	3.1825	3.4918	0.00048438
Sade2115LAG6	17.551	3.4083	5.1495	2.7228e-07
Sade2115LAG7	21.679	3.414	6.35	2.3649e-10
Sade2115LAG8	19.438	3.4165	5.6895	1.3544e-08
Sade2115LAG9	19.417	3.4214	5.675	1.4739e-08
Sade2115LAG10	11.742	3.4254	3.428	0.00061354
Sade2115LAG11	12.009	3.4322	3.4989	0.0004717
Sade2115LAG12	7.6096	3.2765	2.3225	0.020249
Sade2115LAG14	10.162	3.0524	3.3292	0.00087809
Sade2115LAG17	11.116	3.2294	3.4421	0.00058251
Sade2115LAG18	11.712	3.2648	3.5874	0.0003376
Sade2115LAG20	10.934	3.2727	3.3411	0.00084135
Sade2115LAG21	11.483	3.4117	3.3659	0.00076941
Sade2115LAG22	18.452	3.4484	5.351	9.1791e-08
Sade2115LAG23	18.051	3.4451	5.2396	1.6829e-07
Sade2115LAG24	23.277	3.2281	7.2107	6.4957e-13
MerivesiLAG0	0.067552	0.012132	5.5683	2.722e-08
MerivesiLAG33	0.046119	0.011834	3.8972	9.8726e-05
Tunti1	-20.449	5.2233	-3.9149	9.1768e-05
Tunti2	-42.673	5.3054	-8.0433	1.1082e-15
Tunti3	-56.861	5.4665	-10.402	4.6682e-25
Tunti4	-62.315	5.61	-11.108	2.6657e-28
Tunti5	-65.708	5.7533	-11.421	8.4161e-30
Tunti6	-65.281	5.7322	-11.388	1.2113e-29
Tunti7	-56.656	5.5846	-10.145	6.2914e-24
Tunti8	-43.202	5.3878	-8.0185	1.353e-15
Tunti9	-26.136	5.2137	-5.013	5.5645e-07
Tunti10	-12.172	5.1437	-2.3664	0.018004
Tunti16	-11.036	5.1503	-2.1428	0.032181
Tunti17	-15.404	5.2209	-2.9504	0.0031895
Tunti18	-15.676	5.3048	-2.9551	0.0031417
Tunti19	-13.515	5.3032	-2.5484	0.010855
Tunti22	13.208	5.2205	2.53	0.01144
Tunti23	15.64	5.2577	2.9747	0.0029479
Perjantai	7.5341	2.7929	2.6976	0.0070093
Sunnuntai	-9.6697	2.94	-3.289	0.0010132

Number of observations: 4549, Error degrees of freedom: 4506

Root Mean Squared Error: 65.3

R-squared: 0.473, Adjusted R-Squared 0.468

F-statistic vs. constant model: 96.1, p-value = 0

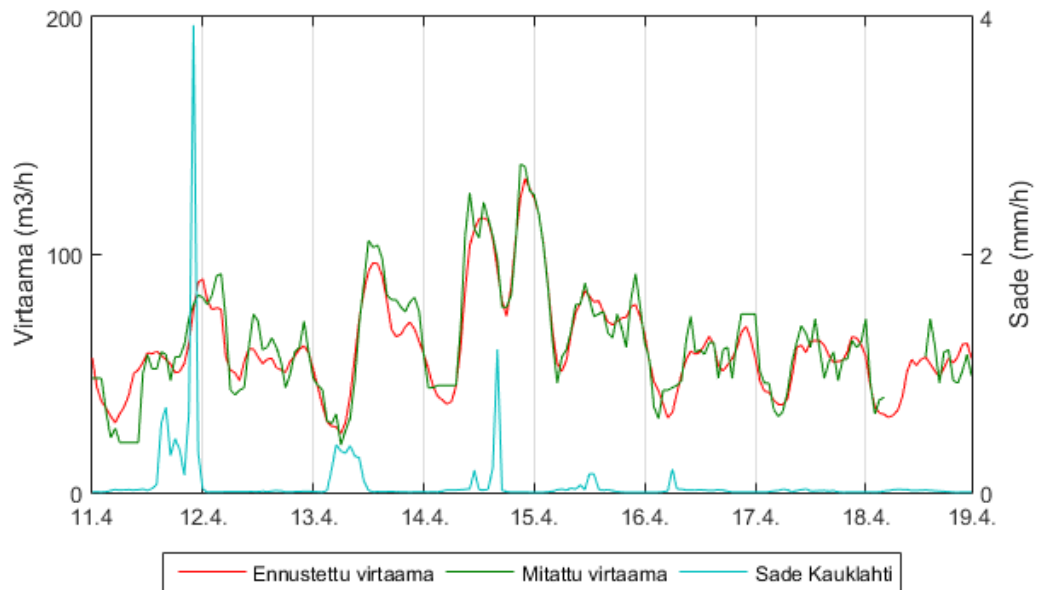
Regressioanalyysi antoi siis samanlaisia tuloksia kuin sade- ja virtaamakäyrien visuaalinen tarkastelu. Tästä voidaan päätellä, että regressioanalyysi toimii hyvin vuoto- ja hule-

vesien selvittämisessä paikallisesti suhteessa toisiin alueisiin. Regressioanalyysissä löytyi kaikille pumppaamoille selkeä ja hyvin todennäköinen korrelaationsuhde edellisen pumppaamon virtaamalle, jolloin sateista saadaan eroteltua melko hyvin edellisen alueen sateen vaikutus oman sateen vuotamisesta viemäriin.

Meriveden korkeudella oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus jokaisen jätevesipumppaamon virtaamaan. Kauklahdessa ja Muulossa sen vaikutus jäi kuitenkin pieneksi, vain 0,005 ja 0,003 kertoimiin yhdelle tuntiviipymälle. Näillä kertoimilla meriveden yhden millin nousu lisäisi jätevesivirtaamaa viisi ja kolme litraa tunnissa. Kauklahdessa meriveden vaikutuksen viipymä oli 24 tuntia, kun taas Muulossa se oli vain 9 tuntia. Tämä on varsin loogista, sillä Muulo sijaitsee lähempänä rantaa. Merivesi ei välttämättä aluksi vaikuta ollenkaan jätevesivirtaamaan, kunnes saavutetaan tietty piste, jonka jälkeen sillä on suuri vaikutus. Merivesi on siis epälineaarinen selittäjä, jonka vaikutusta on vaikea arvioida lineaarisella mallilla. Esimerkiksi tämän takia voisi olla hyödyllistä kehittää mallia epälineaariseen suuntaan.

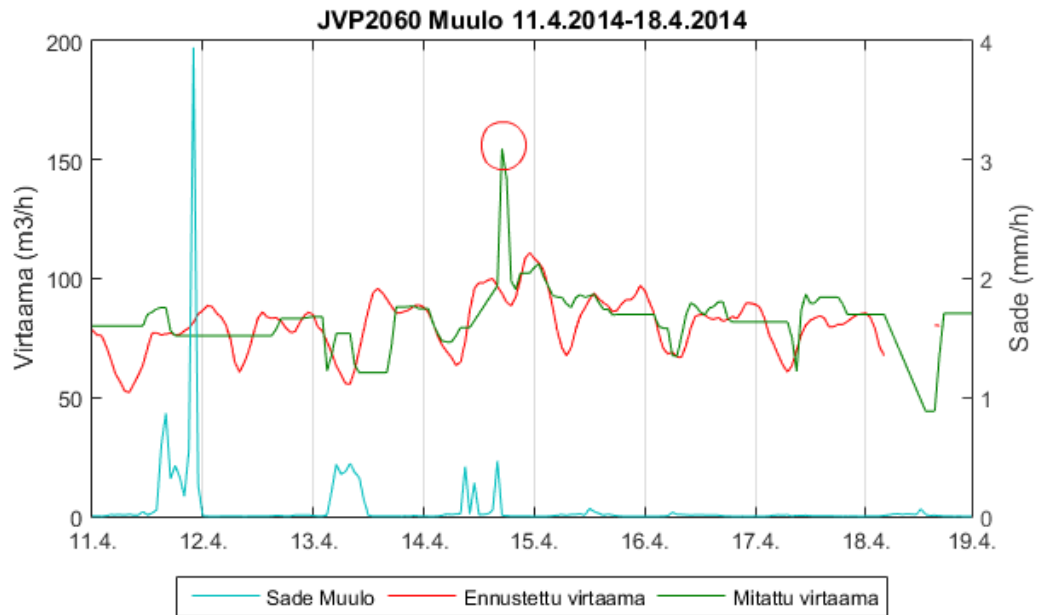
Saunalahdessa merivesi vaikutti 0 ja 33 tunnin viiveillä jätevesivirtaamaan. Meriveden korkeuden välitön vaikutus oli kuitenkin suurempi kuin myöhäisempi vaikutus. Välitön vaikutus johtuu luultavasti siitä, että Saunalahden jätevesipumppaamo sijaitsee rannassa, samoin kuin monet sille johtavat jätevesiviemärit ja kaivot. Myös Saunalahden ylivuotorakenteet on suunniteltu niin, että sen ylivuotovedet ohjataan mereen. Jos nämä ylivuotorakenteet eivät toimi kunnolla, niistä saattaa päästä merivettä jätevesipumppaamolle. Tilastollisesti merkittävien meriveden pinnankorkeuksien yhteenlaskettu kerroin oli Saunalahdessa 0,114. Tämä tarkoittaa yhden millin nousulla 0,1 m<sup>3</sup>/h jätevesivirtaaman lisäystä.

Kauklahden mallin selitysaste on 92,7 %, joka on erittäin korkea arvo mallille. Se kykeneekin kuvan 35 perusteella ennustamaan virtaamaa erittäin hyvin. Saunalahden jätevesivirtaaman lähtötiedot ovat siis todennäköisesti hyvin luotettavia ja malliin on saatu mukaan ilmiön kannalta olennaiset selittäjät.

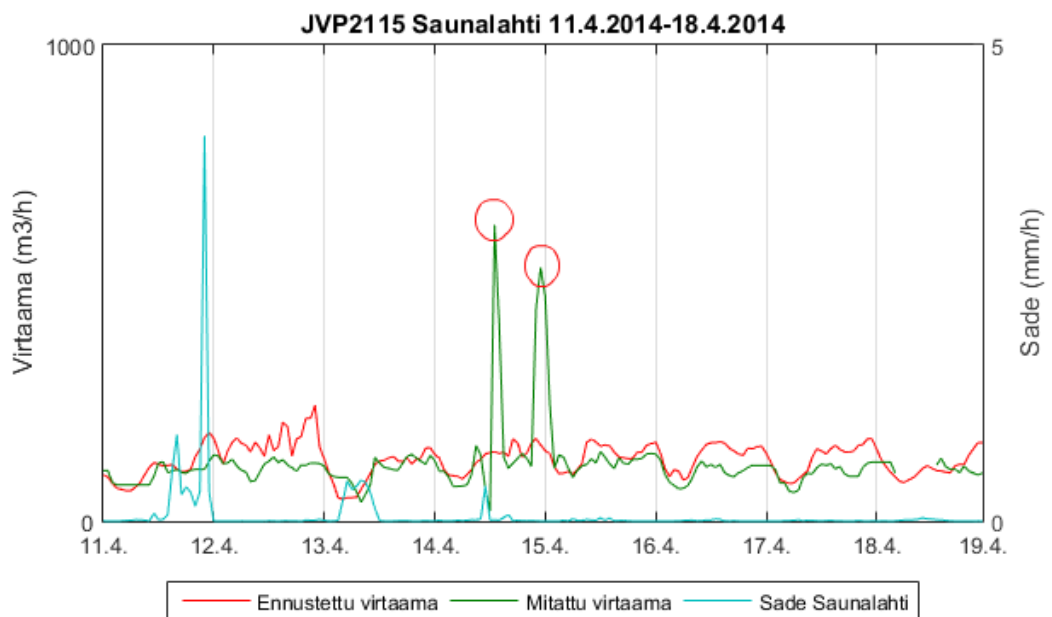


*Kuva 35: Kauklahten mallinnettu jätevesivirtaama 11.4.2014–18.4.2014*

Muulon sekä Saunalahden mallien selitysasteet jäivät alhaisemmiksi kuin Kauklahten. Muulon selitysaste on 59,4 % ja Saunalahden 47,3 %. Näiden kummankin mallin ennustamiskyky on huonompi kuin Kauklahten, mutta silti varsin hyvä. Molempien mallien validointijaksolla on virhearvoja jätevesivirtaamassa (ympyröity kuvissa 36 ja 37). Mallin toimivuutta ja ennustuskykyä on varsin hankala arvioida varmasti, jos datan laatu on huonoa. Huonolaatuinen data pienentää selitysastetta, kun virhelukemat vääristävät mallia. Validointijaksolla se ei myöskään kykene ennustamaan virheitä. Näillä validointijaksoilla pumppaamolla on saattanut olla tiedonsiirtokatkos, jolloin muutaman tunnin virtaamat on summattu yhteen ja seurauksena on kuvissa 36 ja 37 näkyvät virtaamapiikit. Malli ei kykene ennustamaan tällaisia odottamattomia virtaamia. Varsinkin Muulon (kuva 36) virtaamatieto on huonolaatuista ja se sisältää monia perättäisiä tunteja, joille mitattu virtaama on sama. Kummankin virtaamatiedoissa on myös joitakin tunteja, joilta ei ole tietoa mitatusta virtaamasta. Muulon ennustettu jätevesivirtaama kuitenkin myötäilee suuruusluokaltaan hyvin mitattua jätevesivirtaamaa ja sen vaihtelut näyttävät realistisilta.



Kuva 36: Muulon mallinnettu jätevesivirtaama 11.4.2014–18.4.2014



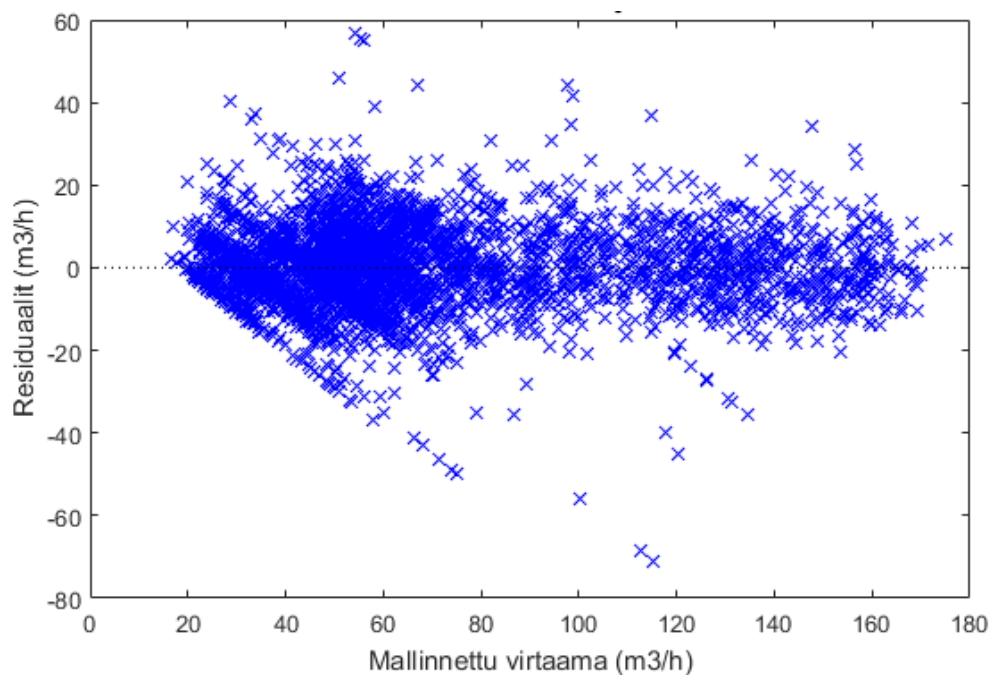
Kuva 37: Saunalahden mallinnettu jätevesivirtaama 11.4.2014–18.4.2014

Saunalahden malli yliarvioi validointijakson virtaamaa sadetapahtumien jälkeen kuvan 37 perusteella. Koska suuret sateet ja raju merenpinnan nousu vaikuttavat jätevesivirtaamaan paljon, saattaa malli yliarvioida pienempien sateiden vaikutuksen. Se olettaa niiden käyttäytyvän samalla logiikalla kuin suuret sateet. Vastaavasti malli aliarvioi vuoden suurimpien sateiden vaikutuksen. Tuloksena on eräänlainen keskiarvo sateen vaikutuksesta.

Jos sateen vaikutusta jätevesivirtaamaan halutaan kuitenkin tutkia karkeasti, suuntaa antavasti ja nopeasti lineaarisella regressioanalyysillä, voivat yleiset oletukset sateiden vaikutuksille olla riittäviä.

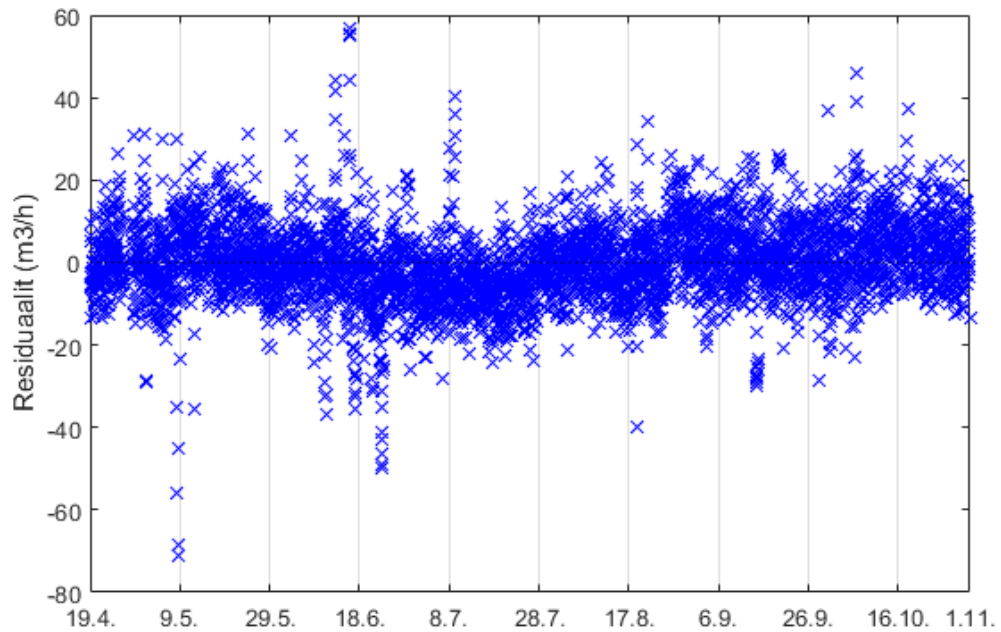
Mallien kertoimien ja ennustekuvaajien lisäksi työssä tutkittiin residuaaleja virtaaman ja ajan funktiona. Residuaalien pitäisi olla mahdollisimman satunnaisia eli niistä ei saisi näkyä minkäänlaisia säännöllisyyksiä.

Kuvan 38 perusteella Kauklahden residuaalit ovat melko tasaisesti sijoittuneita x-akselin ympärille. Kuvasta on erotettavissa viivamaisia ylävasemmalta alaoikealle suuntautuvia viivoja. Näitä voi aiheuttaa esimerkiksi jätevesipumppaamon ajo tasaisella taajuudella, jolloin tuotto on tasaista.



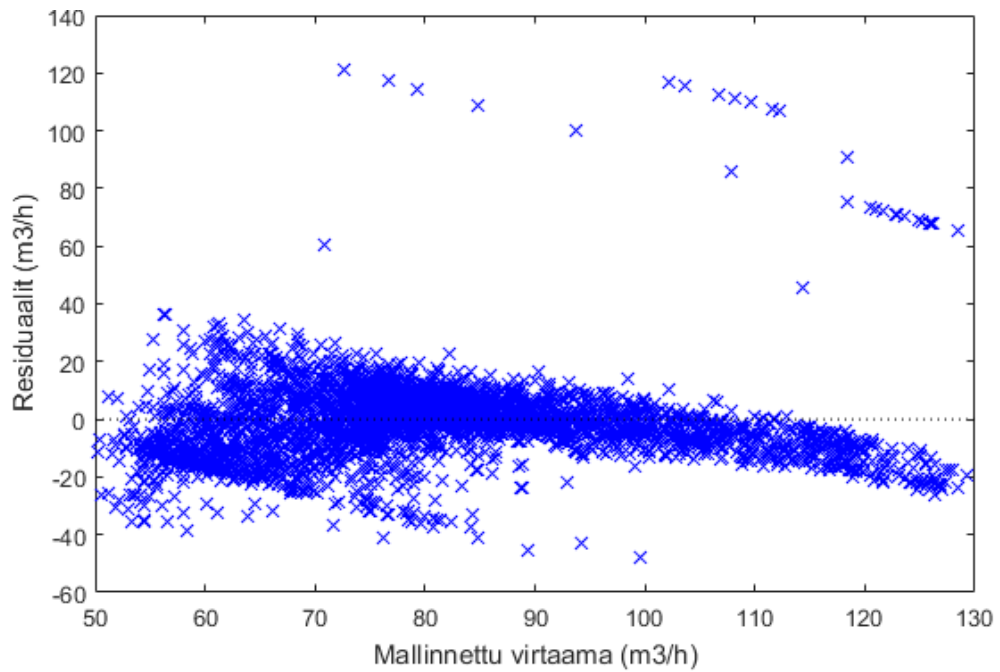
*Kuva 38: Kauklahden residuaalit mallinnetun virtaaman funktiona*

Kuvassa (39) on erotettavissa hieman säännönmukaista vaihtelua residuaaleissa. Kesä- ja heinäkuussa malli yliarvioi jätevesivirtaamaa hieman tavallista enemmän. Tämä voi liittyä vuodenajan vaihtelun vaikutuksiin vuoto- ja hulevesissä. Tämän perusteella mallista voitaisiin saada tarkempi, jos siihen otettaisiin mukaan vuodenajoille tai kuukausille omat selittäjät.

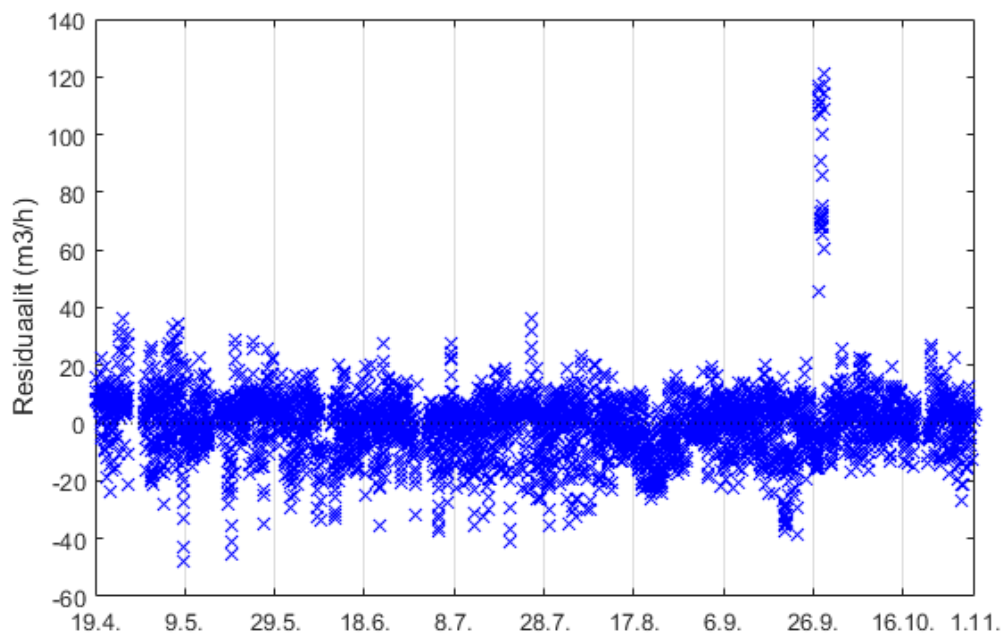


*Kuva 39: Kaukalahden residuaalit ajan funktiona*

Muulossa malli aliarvioi kaikkein suurimmat virtaukset, minkä seurauksena näitä vastaavat residuaalit ovat poikkeavan suuria (kuvat 40 ja 41). On varsin todennäköistä, että kyseiset arvot ovat kuitenkin virhearvoja. Jotta malli selittäisi paremmin myös näitä mahdollisesti virheellisen suuria virtaamamittauksia, se yliarvioi muiden todellisten suurien virtaamien koot. Jos mallia halutaan tulevaisuudessa parantaa tälle pumpaamolle, kannattaa nämä mahdolliset virhearvot poistaa lähtötiedoista. Lähtötietojen huono laatu heikentää tuloksia tarkastelutavasta riippumatta. Niiden parantaminen on ensiarvoisen tärkeää, jotta niistä voidaan tehdä riittävän tarkkaa analyysia.



Kuva 40: Muulon residuaalit mallinnetun virtaaman funktiona

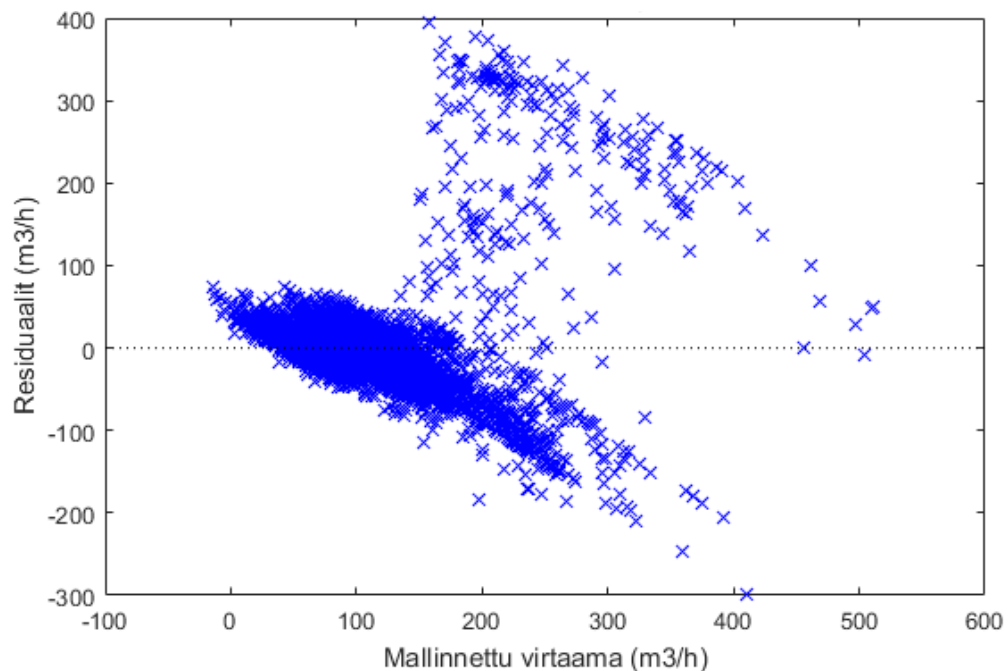


Kuva 41: Muulon residuaalit ajan funktiona

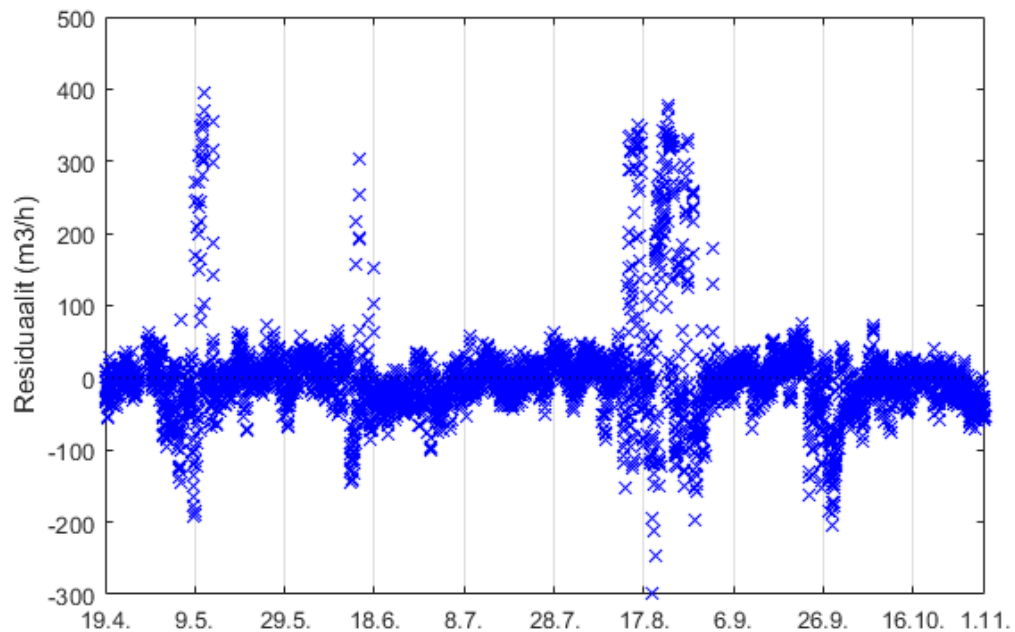
Muulon residuaalien kuvaajasta (kuva 41) nähdään, että residuaaleilla näyttää olevan säännöllinen sykli. Tämä kertoo luultavasti puuttuvasta selittäjästä. Mahdolliset puuttuvat sykliset selittäjät voivat olla esimerkiksi pumpun käyntiaika ja käynnissä olevien pumppejen määrä. Näiden vaikutusta voidaan arvioida myös pumppaamon energiankulutuksella. Suurimmat residuaalit sijaitsevat ajallisesti samassa paikassa, joten ne liittyvät todennäköisesti virhemittaukseen, jota malli ei kykene selittämään.



Saunalahden residuaalit ovat kolmesta jätevesipumppaamosta kaikkein kauimpana lineaarisen regression edellytyksistä. Saunalahdessa on ollut paljon suuria virtaamia, joita malli ei kykene selittämään. Suuret selittämättömät virtaamat nostavat muiden virtaamien suuruuden arviointia ja kallistavat näin residuaaleja alaoikealle (kuva 42). Yli 150 m<sup>3</sup>/h virtaamilla malli yliarvioi virtaaman. Tässä kulkee myös raja, jolloin virtaamamittaus saattaa tuottaa virheellisiä tuloksia, sillä säännönmukaisesti malli ei pysty selittämään näin suuria virtaamia sateella tai merivedellä. Kuva 43 perusteella virheelliset mallinnukset osuvat ajallisesti suurten sateiden ja virtaamapiikkien kohdalle. Tämän perusteella on hyvin todennäköistä, että aiempi oletus virtaamalukemien virheellisyydestä pitää paikkansa. Todennäköinen selitys virhelukemille on, että pumppaamon virtaama-arvio on virheellinen, kun kummatkin pumput ovat päällä. Pumppujen tuottokäyrät mahdollisesti summataan yhteen sen sijaan, että virtaamaoletus perustettaisiin niiden yhteiseen tuottokäyrään. Saunalahden jätevesipumppaamon virtaamamittaus kannattaisi varmistaa toisella mittarilla sateiseen aikaan ja tutkimalla pumppaamon mittauslogiikkaa.



*Kuva 42: Saunalahden residuaalit mallinnetun virtaaman funktiona*



*Kuva 43: Saunalahden residuaalit ajan funktiona*

Tehtyjen analyysien pohjalta vaikuttaa siltä, että Ämmäsuolta Suomenojalle laskevan jätevesiviemärin tutkimustuloksia on vaikea verrata keskenään Saunalahden pumppaamon virheellisen virtaamamittauksen takia. Tutkimustulosten parantamiseksi pumppaamon tuottokäyrä tulee korjata. Toisaalta analyysin mahdollisuus löytää virheitä runkopumppaamoiden lähtötiedoissa on positiivinen uutinen.

Residuaalien rakennetta pitäisi analysoida tarkemmin, jotta saataisiin selville enemmän jaksollisesta vaihtelusta. Residuaalit paljastavat heikoimmat mallit ja pumppaamot joiden lähtötietoja täytyy tarkastella lähemmin. Tämän lisäksi menetelmää voisi kokeilla sovellettavaksi alueelle, josta on tarkat lähtötiedot vähintään vuoden ajalta. Menetelmä toimii kuitenkin vain niille alueille, joissa on virtaamamittarit runkoviemärissä kiinni.

Työssä tarkasteltiin myös kaikkien jätevesipumppaamoiden jäännösarvojen autokorrelaatioita Durbinin ja Watsonin testillä. Sen nollahypoteesina on, että residuaalit eivät ole autokorreloituneita eli niiden arvot eivät riipu muista residuaaleista. Jos nollahypoteesi pitää paikkansa, ovat jäännösvirheet satunnaisia. Durbinin ja Watsonin testin p-arvo oli jokaiselle pumppaamolle nolla. Tämän perusteella voidaan hylätä nollahypoteesi ja todeta, että residuaalit ovat autokorreloituneita.

Tulos voi tarkoittaa, että virtaaman vaihtelun kaikkia selittäviä tekijöitä ei ole löydetty. Puuttuvat selittäjät olisivat luultavasti täysin uusia selittäjiä, eivätkä aiempien selittäjien pidempiä viiveitä, sillä viiveet otettiin huomioon varsin pitkällä aikavälillä. Näitä mahdollisia puuttuvia selittäjiä voivat olla esimerkiksi pohjaveden korkeus, maaperän kosteus, käynnissä olevien pumppujen määrä, käyntiajat sekä käyntitaajuudet, energiankulutus, sateen intensiteetti, vuodenaika tai kuukausi ja läheisten pintavesien korkeus. Näillä tekijöillä voitaisiin saada vähennettyä residuaalien aaltoilua ajan funktiona ja vähennettyä pumppujen logiikoista johtuvia virheitä. Residuaalien aaltoilu voi johtua myös siitä, ettei lähtöoletus selittäjien autokorreloimattomuudesta täyty. Tuloksista ei siis voida suoraan päätellä, että kaikki selittäjät eivät ole mukana, vaan että jatkossa mallia on kehitettävä epälineaariseen suuntaan.

Residuaalien lisäksi tutkittiin, ovatko meriveden korkeus ja sadanta toisistaan riippuvia selittäjiä. Testin sateeksi valittiin Saunalahden sade, sillä se sijaitsi tutkituista alueista lähimpänä rantaa. Korrelaatiokertoimeksi saatiin 0,0892 eli voidaan todeta, että sadanta ja meriveden korkeus eivät merkittävästi korreloi keskenään.

Selittäjille laskettiin myös varianssin inflaatiotekijä eli VIF, joka kuvaa kuinka paljon multikollinearisuus vaikuttaa regressiokertoimien variansseihin. Selittäjän  $X_i$  VIF regressiokertoimelle  $\beta_i$  on esitetty yhtälössä 5.

$$VIF_i = 1/(1-R_i^2), \quad (5)$$

missä  $R_i^2$  on sen mallin selitysaste, jonka selitettävä muuttuja on  $X_i$  ja selittäjinä ovat loput mallin selittäjät. VIF kuvaa siis selittäjän multikollinearisuutta kaikkien mallin selittäjien kanssa.

Selittäjän regressiokertoimen varianssi on sitä suurempi, mitä korkeampi VIF sillä on. Jos VIF on korkea, pienikin muutos mallissa voi johtaa kertoimen huomattavaan muutokseen. Jokaisen jätevesivirtaaman lineaarisen regressioanalyysin selittäjille muodostetut VIF:it on esitetty alla olevassa taulukossa 7. Niistä on jätetty pois kategoriset selittäjät.

*Taulukko 7: Selittäjien varianssien inflaatiotekijät*

Selittäjä	Kauklahti	Muulo	Saunalahti
Sade	1,0217	1,0115	1,0106
Merivesi	1,1478	1,0606	1,1463
Virtaama	1,1605	1,0572	1,1442

Näiden perusteella malleissa ei ole multikollinearisuutta. Selittäjien regressiokertoimien varianssi ei siis ole merkittävästi kasvanut muiden selittäjien takia.

## 7 Yhteenveto

Viemäriverkoston vuoto- ja hulevedet kasvattavat puhdistettavan jäteveden määrää, aiheuttavat ohijuoksutuksia puhdistuslaitoksella ja heikentävät puhdistustuloksen laatua. Vuoto- ja hulevesien haitallisten vaikutusten takia on tärkeää tuntea niiden muodostumisalueet ja määrät.

Tässä diplomityössä pyrittiin tutkimaan kahdella eri matemaattisella menetelmällä missä määrin data-analyysi soveltuu viemäriverkoston vuoto- ja hulevesien selvittämiseen. Ristikorrelaation ja korrelaation yhdistelmässä arvioitiin ensin jätevesivirtaaman ja sateen ajallista yhteyttä, minkä jälkeen voitiin analysoida näiden välinen riippuvuussuhde. Lineaarisessa regressioanalyysissä selitettiin jätevesivirtaama edellisen pumppaamon virtaamalla, sateella, meriveden korkeudella, tunnilla, ja viikopäivällä. Näistä muodostetulla mallilla voitiin arvioida sateen vaikutuksen suuruutta jätevesivirtaamaan.

Ristikorrelaation ja korrelaation yhdistelmällä tulokset olivat heikkoja, sillä menetelmällä muodostetaan liian yksinkertaistettu malli todellisuudesta. Sateiden viiveiden vaihtelut sekä niiden ajoittuminen samaan hetkeen eri osavaluma-alueilla myös vaikeuttavat analyysiä. Lineaarisella regressioanalyysillä taas saatiin oikean suuntaisia tuloksia, mutta kaikki menetelmän käytön edellytykset eivät toteudu esimerkiksi autokorrelaation ja normaalijakautuneisuuden osalta. Menetelmää täytyy tästä syystä kehittää edelleen esimerkiksi epälineaariseen suuntaan ja pyrkiä samalla löytämään mallin ulkopuolelle jääneitä selittäjiä. Tällaisia selittäjiä voivat olla käynnissä olevien pumppujen määrä ja käyntiajat, energiankulutus, sateen intensiteetti, vuodenaika tai kuukausi ja läheisten pintavesien sekä pohjaveden korkeus. Näiden lisäksi virtaamatietojen laatua täytyy parantaa, jotta selityksasteista saadaan parempia. Menetelmää olisi hyödyllistä kokeilla alueella, jonka lähtötiedot ovat hyvälaatuisia mallin jatkokehittämistä varten.

Lineaarisen regressioanalyysin perusteella voitiin päätellä, että data-analyysiä voidaan käyttää vuoto- ja hulevesien selvittämiseen ja menetelmää kehittämällä voidaan luoda työkalu vuoto- ja hulevesien selvittämiseen.

## Lähdeluettelo

Anttila, E. 2007. Paineviemärissä muodostuvan rikkivedyn vähentäminen kemikaloidella. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, kemiantekniikan koulutusohjelma. Helsinki. 95 s.

Bareš V., Stránský D. & Sýkora P. 2012. Evaluation of sewer infiltration/inflow using COD mass flux method: Case study in Prague. *Water Science and Technology*, vol. 66, no. 3, s. 673-680. DOI 10.2166/wst.2012.229.

Bareš V., Stránský D. & Sýkora P. 2009. Sewer infiltration/inflow: Long-term monitoring based on diurnal variation of pollutant mass flux. *Water Science and Technology*, vol. 60, no. 1, s. 1-7. DOI 10.2166/wst.2009.280.

De Bénédictis, J. & Bertrand-Krajewski, J. 2005 a. Infiltration in sewer systems: Comparison of measurement methods. *Water Science and Technology*, vol. 52, no. 3, s. 219-227. ISSN 0273-1223.

De Bénédictis J. & Bertrand-Krajewski J.-L. 2005 b. Measurement of infiltration rates in urban sewer systems by use of oxygen isotopes. *Water Science and Technology*, vol. 52, no. 3, s. 229-237. ISSN 1996-9732.

Dorval F.A., Chocat B., Emmanuel E. & Lipeme Kouyi G. 2010. Sewer system flow components identification using signal processing. *Water Science and Technology*, vol. 62, no. 1, s. 106-114. DOI 10.2166/wst.2010.281.

Finnish Consulting Group 2012. Mallipumppaamoiden automaattioselostus – alasemaurakka. 13 s. Tilattu selostus.

Gokhale, S. & Graham, J.A. 2004. A new development in locating leaks in sanitary sewers. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1, vol. 19, no. 1, s. 85-96. ISSN 0886-7798. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.tust.2003.08.003>.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2014. Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2013 – Viikinmäen ja Suomenojan puhdistamot. Verkkojulkaisu. [Lainattu 22.4.2015] Saatavilla:

[https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/Documents/Julkaisut/2\\_2014\\_Jatevedenpuhdistus\\_paakaupunkiseudulla2013.pdf](https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/Documents/Julkaisut/2_2014_Jatevedenpuhdistus_paakaupunkiseudulla2013.pdf)

Hietanen, T. 2008. Viemäriverkoston alueellisen vuotovesimäärän selvittäminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja ympäristötekniikka. Espoo. 97 s.

Houhou J., Lartiges B.S., France-Lanord C., Guilmette C., Poix S. & Mustin C. 2010. Isotopic tracing of clear water sources in an urban sewer: A combined water and dissolved sulfate stable isotope approach. Water Research, vol. 44, no. 1, s. 256-266. DOI 10.1016/j.watres.2009.09.024.

Ilmatieteen laitos 2015 a. Ilmatieteen laitoksen vahvistama teoreettinen keskivesi (mm). Verkkosivusto. [Viitattu 10.11.2015] Saatavilla: <http://cdn.fmi.fi/legacy-fmi-fi-content/documents/keskivesi/fi/2011.html>

Ilmatieteen laitos 2015 b. Meriveden korkeushavainnot. Verkkosivusto. [Viitattu 10.11.2015] Saatavilla: [http://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data-meriveden-  
korkeushavainnot](http://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data-meriveden-korkeushavainnot)

Ilmatieteen laitos 2015 c. Sadetta ja poutaa. Verkkosivusto. [Viitattu 10.11.2015] Saatavilla: <http://ilmatieteenlaitos.fi/sade>

Ilmatieteen laitos 2015 d. Vedenkorkeuden mittaaminen. Verkkosivusto. [Viitattu 10.11.2015] Saatavilla: <http://ilmatieteenlaitos.fi/mareografi>

Janhunen, P. 2016. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän verkkopalveluyksikön päällikkö, DI. Haastattelu Helsingissä 9.1.2016.

Karpf C., Hoeft S., Scheffer C., Fuchs L. & Krebs P. 2011. Groundwater infiltration, surface water inflow and sewerage exfiltration considering hydrodynamic conditions in

sewer systems. *Water Science and Technology*, vol. 63, no. 9, s. 1841-1848. DOI 10.2166/wst.2011.388.

Karpf, C. & Krebs, P. 2011. Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach. *Water Research*, 5, vol. 45, no. 10, s. 3129-3136 ISSN 0043-1354. DOI 10.1016/j.watres.2011.03.022.

Karttunen, E. 2003. *Vesihuolto 1*. Helsinki: RIL. 314 s. ISBN 951-758-431-8.

Kracht, O., Gresch, M. & Gujer, W. 2008. Innovative tracer methods for sewer infiltration monitoring. *Urban Water Journal*, vol. 5, no. 3, s. 173-185. ISSN 1573062X. DOI 10.1080/15730620802180802.

Kracht O. & Gujer W. 2005. Quantification of infiltration into sewers based on time series of pollutant loads. *Water Science and Technology*, vol. 52, no. 3, s. 209-218. ISSN 1996-9732.

Lakso, E. 1991. *Vesi- ja viemärlaitokset 1 : käyttöveden jakelu ja viemäriveden kokoaminen : luentomoniste*. Oulu: Oulun yliopisto. 167 s ISBN 951-42-2295-4.

Métadier, M. & Bertrand-Krajewski, J.L. 2011 a. Assessing dry weather flow contribution in TSS and COD storm events loads in combined sewer systems. *Water Science and Technology*, vol. 63, no. 12, s. 2983-2991. ISSN 1996-9732.

Métadier, M. & Bertrand-Krajewski, J.L. 2011 b. From mess to mass: A methodology for calculating storm event pollutant loads with their uncertainties, from continuous raw data time series. *Water Science and Technology*, vol. 63, no. 3, s. 369-376. ISSN 1996-9732.

Muleta M. & Boulos P., 2008. Analysis and calibration of RDII and design of sewer collection systems. *World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua'a - Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2008*.



Prigiobbe, V. & Giulianelli, M. 2009. Quantification of sewer system infiltration using d18O hydrograph separation. *Water Science and Technology*, vol. 60, no. 3, s. 727-735. ISSN 02731223. DOI 10.2166/wst.2009.399.

Seppinen, J. 2010. Sekaviemärijärjestelmän hulevesikuormituksen vähentäminen. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Espoo. 114 s.

Yang W., Vollertsen J. & Hvitved-Jacobsen T. 2004. Anoxic control of odour and corrosion from sewer networks. *Water Science and Technology*, vol. 50, no. 4, s. 341-349. ISSN 1996-9732.

Zhang L., De Schryver P., De Gussemé B., De Muynck W., Boon N. & Verstraete W. 2008. Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review. *Water Research*, vol. 42, no. 1-2, s. 1-12. DOI 10.1016/j.watres.2007.07.013.

Zhang Z. 2007. Estimating rain derived inflow and infiltration for rainfalls of varying characteristics. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 133, no. 1, s. 98-105. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(98).

Zhang Z. 2005. Flow data, inflow/infiltration ratio, and autoregressive error models. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 131, no. 3, s. 343-349. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:3(343).

## Liite 1. Dummy-selittäjät

Tunteja tai viikonpäiviä ei voida syöttää yhtenä numerosarjana eli 1,2,3,4,5,... sarakkeena malliin, sillä silloin jokaisen tunnin arvolle laskettaisiin sama kerroin. Tällöin kello kahdeksan vaikutuksen virtaamaan laskettaisiin olevan kahdeksan kertaa kerroin ja kello yksi vaikutus olisi kertoimen suuruinen. Kello kahdeksan vaikutus olisi siis kahdeksan-kertainen kello yhteen verrattuna. Tämän takia tarvitaan muuttujia, jotka saavat aikasarjassa arvon 1 vain oikean viikonpäivän ja tunnin kohdalla. Tällaisia muuttujia, jotka luodaan kategorisesta sarjasta, kuten tuntien kohdalla 1,2,3,4,5,... muotoisesta sarjasta, kutsutaan dummy-muuttujiksi. Kun kello on kahdeksan, ei se voi olla samanaikaisesti esimerkiksi seitsemän, yksitoista tai kolme. Tällöin kello kahdeksan totuusarvo on yksi ja muiden tuntien totuusarvo on nolla.

Sateesta tai virtaamasta ei käytetä dummy-muuttujia, sillä ne saavat tietyt numeeriset arvot. Jos niistä luotaisiin dummy-muuttujia, saisi jokainen mitattu sademäärä matriisiin oman sarakkeensa, joka saisi arvon yksi juuri sillä hetkellä aikasarjassa, kun sademäärä olisi oikea. Tällä metodilla selittäjien määrästä tulisi valtava. Kun selittäjä ei kuitenkaan ole mitattu arvo, vaan esimerkiksi mittaustunti, voidaan dummy-muuttujilla luoda selittäjiä, joilla saadaan näiden tekijöiden vaikutukset huomioitua.

Kun analyysissä arvioidaan vaikkapa 18.6.2014 kello 20 jätevesivirtaamaa, halutaan ottaa huomioon, että tuolloin oli keskiviikkoilta. Tarvitaan siis muuttujat, jotka saavat aikasarjassa tuolloin arvon yksi muiden tunti- ja viikonpäiväselittäjien saadessa arvot 0. Tähän tarkoitukseen tunti- ja viikonpäivämuuttujille luotiin alla olevien taulukoiden 8 ja 9 kaltaiset matriisit. Näille kaikille tunti- ja viikonpäivämuuttujille voidaan laskea p-arvo ja kerroin, jolla lukua 1 kerrotaan aikasarjassa vain niille hetkille, joina sekä tunti että viikonpäivä ovat oikeat.

*Taulukko 8: Päivämatriisi*

<b>Ti</b>	<b>Ke</b>	<b>To</b>	<b>Pe</b>	<b>La</b>	<b>Su</b>
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0

*Taulukko 9: Tuntimatriisi*

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0

Koska regressioanalyysissä tällaisten kategoristen muuttujien, kuten tunnin tai viikonpäivän, kerroin lasketaan suhteessa johonkin referenssitason, on jokin ajanhetki laskettava referenssitasoksi. Referenssitaso voidaan määritellä niin, että kun mikään muu viikonpäivä ei saa arvoa yksi, on kyseessä oltava referenssitason viikonpäivä. Esimerkiksi kun taulukossa 3 yksikään viikonpäivistä tiistaista sunnuntaihin ei saa arvoa yksi, on viikonpäivän oltava maanantai, jota pidetään tässä tapauksessa referenssitasona.

Regressioanalyysissä on oltava määritetty referenssitaso vakiokerroimen takia. Vakiokerroin kuvaa tiettyä tilannetta, johon muita dummy-muuttujien hetkiä verrataan. Jos selittäjiin halutaan sisällyttää kaikki viikonpäivät ja tunnit ilman referenssitasoa, on vakiokerroin jätettävä pois koko regressioanalyysistä. Tässä työssä haluttiin sisällyttää vakiokerroin mukaan analyysihin, sillä se kuvaa ajallisen referenssitason arvon lisäksi myös muuta selittäjän ja selittäjien erotuksesta jäljelle jäävää arvoa.